

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

**Střídavý pohon s regulací
na konstantní moment**

AC drive regulated to constant torque

Diplomová práce

Autor:	František Novák
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Eva Konečná, CSc.
Konzultant:	Ing. Jiří Kubín, PhD.

Počet stran: 66
Počet příloh: 3

2007

Anotace

Cílem této diplomové práce je momentová regulace střídavého pohonu řízeným frekvenčním měničem. Zejména zjistit vliv nastavení proudového regulátoru měniče na stavu asynchronního motoru a určit závislost tokotvorné a momentotvorné složky satorového proudu na velikosti a tvaru momentové zátěže. Práce je realizována na pracovišti se dvěma motory od firmy Siemens, přičemž stejnosměrný stroj slouží jako hnací a je spojen s hnaným asynchronním motorem hřídelí. Regulace momentu a zatěžování různými momentovými průběhy je prováděna na asynchronním motoru.

Napájení motorů je realizováno frekvenčním měničem Simovert Masterdrives (asynchronní motor), resp. řídicí jednotkou Simoreg (stejnosměrný pohon). Parametrizace těchto jednotek je komfortně prováděna z počítače pomocí Softwaru Simovis.

Různé momentové zátěže jsou realizovány v programu Matlab Simulink a přes měřicí kartu Humusoft MF 604 a digitální výstupy přivedeny do frekvenčního měniče, který napájí asynchronní motor.

Annotation

Aim of this diploma work is the torque regulation of an AC drive, which is fed by frequency converter. Especially to discover the influence of the settings of the current controller as part of the frequency converter on the AC drives conditions and explore characteristics between the torque-generating and run-generating elements of the stator current and the size and form of the torque stress. The work is realized in the drive laboratory. There are two Siemens drives. The first one is a DC drive and is the driving one. The second is an asynchrony DC drive and is being driven. The torque regulation and straining with different torque curves is being executed on the asynchrony motor.

The feeding of the drives is made by the frequency converter Simovert Masterdrives in case of the AC motor and by the regulating unit Simoreg in case of the DC motor. The parameterization of both units is user-friendly executed from the computer via the software Simovis.

Different torque stresses are realized in the program Matlab Simulink and sent via the measuring card Humusoft MF 604 and digital outputs from the computer to the frequency converter, which feeds the asynchrony motor.

Annotation

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Drehmomentregulierung des Wechselstromantriebs, der durch einen Frequenzwandler gesteuert wird. Besonders die Ermittlung des Einstellungseinflusses des Stromregulators des Frequenzwandlers auf den Zustand des Asynchronantriebs und die Feststellung der Abhängigkeit des Strom- und Drehmomentbildenden Bestandteils des Ständerstroms von Größe und Form der Drehmomentbelastung. Die Arbeit wurde im Labor mit zwei Motoren realisiert. Der erste ist ein Gleichstrommotor und hat antreibende Funktion. Er ist durch eine Motorwelle mit dem angetriebenen Asynchronmotor verbunden. Die Drehmomentregulierung und Belastung mit verschiedenen Drehmomentabläufen wurde am Asynchronmotor durchgeführt.

Die Speisung der Motoren wird mit dem Frequenzwandler Simovert Masterdrives (im Falle des Asynchronmotors), bzw. mit der Regulierungseinheit Simoreg (im Falle des Gleichstrommotors) realisiert. Die Parametrisierung dieser Einheiten wird benutzerfreundlich vom Computer mit Hilfe der Software Simovis durchgeführt.

Verschiedene Drehmomentbelastungen werden im Programm Matlab Simulink realisiert und mittels Messkarte Humusoft MF 604 und digitale Ausgänge aus dem Computer in den Frequenzwandler gebracht.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 18.5.2007

Podpis

Chtěl bych poděkovat Doc. Ing. Evě Konečné, CSc., vedoucímu diplomové práce, za cenné rady, připomínky, poskytnuté materiály a vedení při tvorbě této publikace. Dále konzultantovi Ing. Jiřímu Kubínovi, PhD. za pomoc při realizaci měření v praktické části, poskytnutí praktických rad a materiálů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým blízkým, zejména pak rodičům za materiální a duševní podporu v průběhu celého studia.

Liberec, květen 2007

Autor

Obsah

Použité zkratky a symboly.....	9
Seznam obrázků.....	10
1 Úvod.....	13
2 Pohony s asynchronními motory a jejich řízení.....	14
2.1 Charakteristika asynchronního stroje.....	14
2.2 Způsoby řízení asynchronních strojů.....	14
2.2.1 Skalární řízení.....	15
2.2.1.1 Kmitočtové - proudové řízení.....	17
2.2.1.2 Kmitočtové – napěťové řízení.....	17
2.2.2 Vektorové řízení.....	19
2.2.2.1 Základní principy vektorového řízení.....	19
2.2.2.2 Základní schéma vektorového řízení.....	21
2.2.2.3 Vektorová regulace proudového typu.....	22
2.2.2.4 Vektorová regulace napěťového typu.....	23
3 Frekvenční měniče.....	24
3.1 Frekvenční měniče firmy Siemens.....	24
3.1.1 Regulační módy měniče Simovert Masterdrives.....	25
3.1.2 BICO technologie.....	26
3.1.3 Parametry a parametrování měniče Simovert Masterdrives.....	26
3.1.3.1 Obsluha a parametrování pomocí programu Simovis.....	28
4 Multifunkční karta Humusoft MF 604.....	30
4.1 Používání multifunkční karty v prostředí Matlab Simulink.....	30
5 Momentové čidlo.....	32
6 Otáčkové IRC čidlo.....	33
7 Experimentální část.....	34
7.1 Laboratoř s pohony KEL.....	34
7.2 Uzpůsobení pracoviště pro měření momentu.....	35
7.3 Základní měření skoku momentu.....	37
7.3.1 Nastavení motorů pro měření.....	37
7.3.2 Naměřené hodnoty.....	39
7.4 Vliv nastavení parametrů proudového regulátoru na provozní stavy asynchronního stroje.....	44

7.4.1	Nastavení motorů pro měření	44
7.4.2	Naměřené hodnoty	44
7.5	Měření vlivu průběhu zátěže na stavy asynchronního motoru	50
7.5.1	Nastavení motorů pro měření	50
7.5.2	Naměřené hodnoty	50
7.5.2.1	Sinusový průběh momentu	50
7.5.2.2	Trojúhelníkový průběh momentu	54
7.5.2.3	Obdélníkový průběh momentu	57
7.6	Zhodnocení dosažených výsledků	62
8	Závěr	64
9	Literatura.....	65
10	Přílohy.....	66

Použité zkratky a symboly

Seznam zkratek

A/D	analogově – digitální převodník
AC	střídavé napětí (z AJ: Alternating Current)
AJ	anglický jazyk
AS	asynchronní stroj
BICO	binektor-konektor
DC	stejnoseměrné napětí (z AJ: Direkt Current)
EMC	elektromagnetická kompatibilita (Electromagnetic Compatibility)
KEL	Katedra elektrotechniky
Mmn	magnetomotorické napětí
OP1S	ovládací panel (z AJ: operation panel)
PC	osobní počítač (z anglického jazyka: personal computer)
PI	proporcionálně integrační
PMU	parametrizační jednotka (z AJ: parametrisation unit)
PWM	pulzně-šířková modulace (z AJ: pulse-width modulation)
Reg	regulátor
RI	regulátor proudu
VC	vektorové řízení (z AJ: vector control)

Seznam symbolů

Ψ	magnetický tok
n	otáčky stroje
s	skluz
f	frekvence
M	moment
U	napětí
R	odpor
I	proud
ω	úhlová rychlost
X	indukčnost

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Momentové charakteristiky a pracovní bod asynchronního stroje.....	15
Obr. 2-2: Kompenzace vlivu odporu statoru.....	16
Obr. 2-3: Blokové schéma kmitočtově – proudového řízení.....	17
Obr. 2-4: Blokové schéma kmitočtově – napěťového řízení.....	18
Obr. 2-5: Znázornění nelineárního členu.....	18
Obr. 2-6: Náhradní schéma asynchronního stroje.....	20
Obr. 2-7: Vektorový diagram.....	20
Obr. 2-8: Principiální schéma vektorového řízení.....	21
Obr. 2-9: Schéma vektorové regulace proudového typu.....	22
Obr. 2-10: Schéma vektorové regulace napěťového typu.....	23
Obr. 3-1: Blokové schéma zapojení frekvenčního měniče Simovert Masterdrives.....	25
Obr. 3-2: Značení signálů BICO technologie.....	26
Obr.: 3-3: Jednoduchý ovládací panel – PMU.....	28
Obr. 3-4: program Simovis – výběr pohonu.....	29
Obr. 3-5: program Simovis – parametrizace pohonu.....	29
Obr. 4-1: Multifunkční karta Humusoft MF 604.....	30
Obr. 4-2: Použití karty Humusoft MF 604 v Simulinku.....	31
Obr. 5-1: Schematické znázornění momentového čidla v laboratorním pohonu.....	32
Obr. 6-1: IRC čidlo.....	33
Obr. 7-1: Ideové schéma zapojení pohonu v laboratoři EL2.....	34
Obr. 7-2: Parametry pohonu v Simovisu s popisky.....	35
Obr. 7-3: Rozdělená obrazovka Simovisu – parametry a trace.....	36
Obr. 7-4: Nastavení otáček stejnosměrného motoru.....	37
Obr. 7-5: Detail okna trace.....	38
Obr. 7-6: Proudý při měření skoku momentu z 0 na 100%.....	39
Obr. 7-7: Napětí a frekvence při měření skoku momentu z 0 na 100%.....	40
Obr. 7-7: Moment a otáčky při měření skoku momentu z 0 na 100%.....	40
Obr. 7-8: Proudý při měření skoku momentu z 0 na 100% při 50% otáčkách.....	42
Obr. 7-9: Napětí a frekvence při měření skoku momentu z 0 na 100% při 50% otáčkách.....	42

Obr. 7-10: Moment a otáčky při měření skoku momentu z 0 na 100% při 50% otáčkách.....	43
Obr. 7-12: Proudý při továrním nastavení proudového regulátoru.....	44
Obr. 7-13: Napětí a frekvence při továrním nastavení proudového regulátoru.....	45
Obr. 7-14: Moment a otáčky při továrním nastavení proudového regulátoru.....	45
Obr. 7-15: Moment a otáčky při hodnotách proudového regulátoru $P=0,231$ a $I=6$	46
Obr. 7-16: Proudý při hodnotách proudového regulátoru $P=0,700$ a $I=200$	47
Obr. 7-17: Napětí a frekvence při hodnotách proudového regulátoru $P=0,700$ a $I=200$	47
Obr. 7-18: Moment a otáčky při hodnotách proudového regulátoru $P=0,700$ a $I=200$	48
Obr. 7-19: Proudý při hodnotách proudového regulátoru $P=0,900$ a $I=200$	48
Obr. 7-20: Napětí a frekvence při hodnotách proudového regulátoru $P=0,900$ a $I=200$	49
Obr. 7-21: Moment a otáčky při hodnotách proudového regulátoru $P=0,900$ a $I=200$	49
Obr. 7-22: Proudý při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,63s.....	51
Obr. 7-23: Napětí a frekvence při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,63s.....	52
Obr. 7-24: Momenty a otáčky při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,63s.....	52
Obr. 7-25: Momenty a otáčky při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,5s.....	53
Obr. 7-26: Momenty a otáčky při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,4s.....	54
Obr. 7-27: Proudý při zatěžování trojúhelníkovým průběhem momentu o periodě 0,5s.....	55
Obr. 7-28: Momenty a otáčky při zatěžování trojúhelníkovým průběhem momentu o periodě 0,5s.....	56
Obr. 7-29: Momenty a otáčky při zatěžování trojúhelníkovým průběhem momentu o periodě 0,25s.....	57
Obr. 7-30: Proudý při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 1s.....	58
Obr. 7-31: Napětí a frekvence při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 1s.....	58
Obr. 7-32: Momenty a otáčky při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 1s.....	59
Obr. 7-33: Momenty a otáčky při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 0,2s.....	59

Obr. 7-34: Proudý při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu s amplitudou 13,725 Nm.....	60
Obr.7-35: Napětí a frekvence při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o amplitudě 13,725Nm.....	61
Obr.7-36: Momenty a otáčky při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o amplitudě 13,725Nm.....	61

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je stanovit podmínky regulace na konstantní moment stejnosměrného motoru s cizím buzením, který je hnacím motorem laboratorního pohonu. Toto je realizováno na měřicím pracovišti elektrických pohonů katedry elektrotechniky (KEL) Technické univerzity v Liberci (TUL). Pracoviště je vybaveno elektrickým pohonem skládajícím se ze střídavého asynchronního motoru a stejnosměrného motoru s cizím buzením. Každý z motorů je napájen vlastním řízeným měničem a může pracovat v motorickém i generátorickém chodu.

Hnaným strojem je asynchronní motor s kotvou nakrátko a označením 1LA71066. Je řízen frekvenčním měničem Simovert Masterdrives 6SE7016-1EA61. Hnací část laboratorního pohonu je tvořena stejnosměrným motorem s cizím buzením, typové označení 1GG4104, který je řízen měničem Simoreg 6RA7013-6DV62-0. Jak měniče, tak i motory jsou vyrobeny firmou Siemens. V praktické části této práce je zkoumán jednak vliv různého momentového zatížení na asynchronní motor a také vliv proudového regulátoru frekvenčního měniče na stavy asynchronního motoru.

Soustava těchto pohonů je spojena přes rozhraní RS 232 s osobním počítačem, což pomocí vhodného softwaru – programu Simovis firmy Siemens – umožňuje nastavování a ovládání parametrů frekvenčního měniče Simovert, který je předřazen asynchronnímu motoru.

Postup řešení regulace na konstantní moment spočívá ve zjištění chování asynchronního motoru a zejména jeho momentu při různých způsobech řízení i zatěžování.

2 Pohony s asynchronními motory a jejich řízení

2.1 Charakteristika asynchronního stroje

V dnešní době je asynchronní motor nejčastěji používaný elektromotor. Je to dáno jeho dobrými provozními vlastnostmi a jednoduchou konstrukcí s níž souvisí i dobrá spolehlivost. Je možno jej použít v širokém výkonovém rozsahu od jednotek až po stovky kW, což zajišťuje širokou škálu aplikací pro tento pohon.

Podle provedení rotoru se asynchronní motory dělí na stroje:

- s kotvou nakrátko,
- s vinutou (kroužkovou) kotvou
- a speciální.

Nejrozšířenějším typem asynchronních pohonů jsou právě stroje s kotvou nakrátko [3].

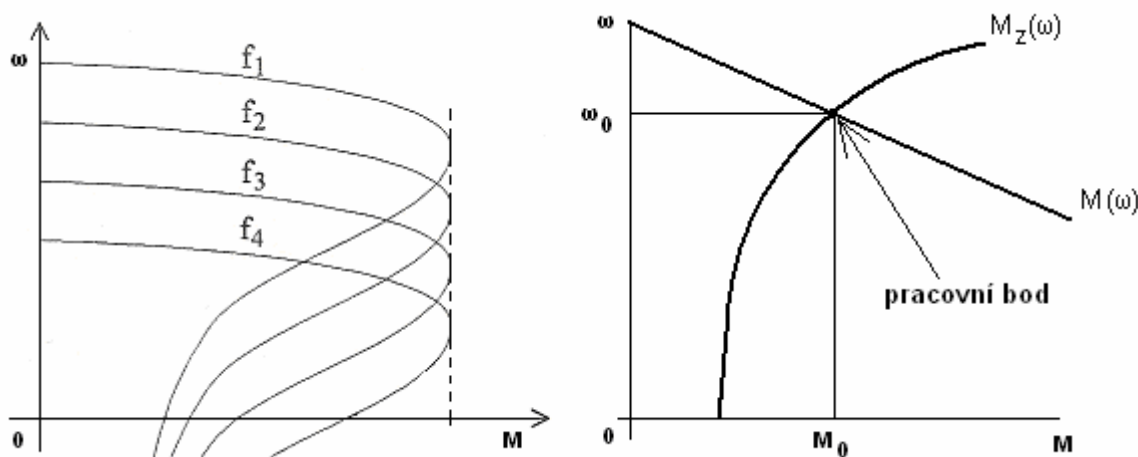
2.2 Způsoby řízení asynchronních strojů

Regulaci asynchronního motoru dosáhneme v současné době nejčastěji změnou kmitočtu napájecího napětí. Způsoby této regulace vycházejí ze vztahu (2-1):

$$n = \frac{60 * f}{p} (1 - s) \quad (2-1)$$

Indukované napětí musí být v rovnováze s napájecím napětím stroje a závisí jak na vstupním kmitočtu, tak i na magnetickém toku stroje. Kvalitní regulace, kde je třeba se vyhnout nepříznivému ovlivnění vlastností stroje, vyžaduje pak nejen změnu kmitočtu, ale současně i změnu napájecího napětí. Je-li motor připojen na zdroj konstantního kmitočtu, má pouze jednu momentovou charakteristiku $M=M(s)$ a tedy pouze jeden stabilní pracovní bod stroje. S možností měnit jak napájecí napětí, tak i frekvenci, můžeme dosáhnout regulace požadovaných výstupních veličin (momentu a otáček stroje) za různých podmínek. Máme tedy k dispozici více momentových charakteristik $M = M(s)$ (obr. 2-1a) a tím i více stabilních pracovních bodů. Pracovním bodem rozumíme průsečík charakteristik hnacího a zátěžného momentu, tedy bod, ve kterém je zátěžný moment M_z roven hnacímu momentu M . Jak je vidět z obrázku 2-1b, je pak úhlové zrychlení ϵ rovno nule a tento stav nazýváme ustáleným během (chodem) motoru.

Je tedy zřejmé, že pro dosažení širokého regulačního rozsahu je třeba asynchronní stroj napájet ze zdroje proměnného kmitočtu i nezávisle proměnného napětí. Moderní řídicí jednotky, mezi které řadíme i frekvenční měniče Simovert od firmy Siemens, toto umožňují [1].



Obr. 2-1: Momentové charakteristiky a pracovní bod asynchronního stroje

Základními dvěma způsoby řízení asynchronních strojů jsou skalární řízení a vektorové řízení. Prvně jmenovaný způsob se v současnosti používá už jen při jednoduchých aplikacích a na významu získává regulace vektorová.

2.2.1 Skalární řízení

Tento způsob řízení asynchronního motoru byl používán hlavně dříve než bylo zdokonaleno řízení vektorové. Již z názvu je možno odvodit, že statorový proud a další proměnné veličiny jsou zde považovány za skalární hodnoty. Skalární způsob řízení je poměrně jednoduchý, ale neumožňuje na rozdíl od vektorového dosáhnout dobrých dynamických parametrů například při rozběhu. Je proto používán už jen u jednodušších aplikací jako jsou pohony čerpadel a ventilátorů.

Skalární řízení, zvané také U/f řízení vychází z požadavku konstantního magnetického toku ve stroji. Proto je třeba se změnou statorového kmitočtu provést i změnu výstupního napětí měniče.

Obecně pro každý magneticky svázaný elektrický obvod platí pro základní harmonické složky vztah (2-2):

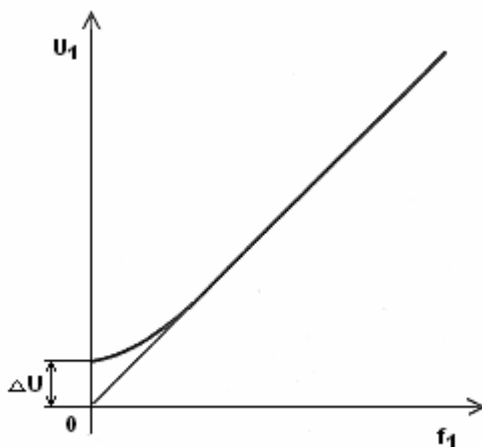
$$U = R * I + \frac{d\psi}{dt}, \quad \psi = |\psi| * e^{j\omega t} \quad (2-2)$$

Rovnici, ve které provedeme derivaci pak zapíšeme pro jednu fázi statorového vinutí asynchronního stroje a za předpokladu $\omega_1 = 2 * \pi * f_1$ a $|\psi| = konst.$ dostaneme rovnici (2-3):

$$u_1 = R_1 * i_1 + k * f_1 * \psi_1 \quad (2-3)$$

Zanedbáme-li statorový proud, platí pak, že $u_1 / f_1 = konst.$

Při snižujícím se kmitočtu a tím i otáčivé rychlosti klesá indukované napětí a reaktanční úbytky. Ne však odporový úbytek. Ten se při konstantním proudu téměř nemění, začíná se tedy více uplatňovat a musíme jej kompenzovat, abychom zajistili práci stroje při konstantním magnetickém toku i v nízkých otáčkách. Systém je vzhledem k sycení obvodu stroje nelineární, napětí musí klesat pomaleji, než odpovídá poklesu kmitočtu. Pro jednoduchost lze nelinearitu nahradit přímkou – kompenzace vlivu odporu statoru (obr. 2-2).



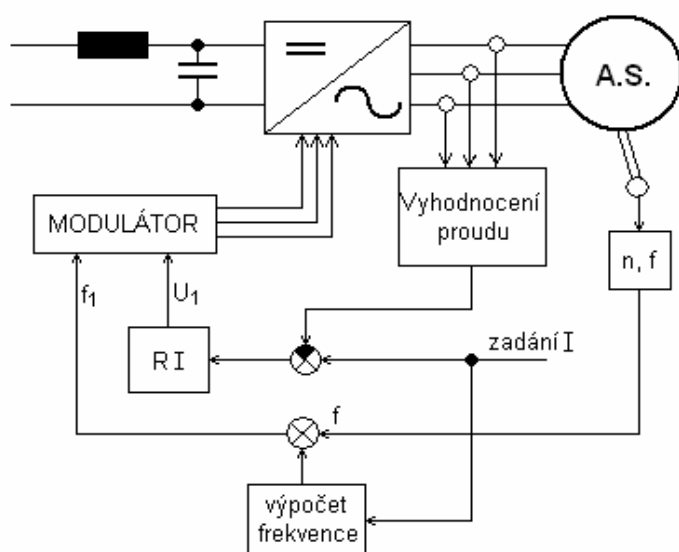
Obr. 2-2: Kompenzace vlivu odporu statoru

Rozdíl napětí ΔU , o který se liší ideální charakteristika od reálné představuje úbytky napětí na elektrických prvcích stroje – ztráty.

Regulaci pohonu pomocí skalárního řízení můžeme rozdělit na dva základní typy. Podle satorové hodnoty, která se za daného režimu řízení udržuje konstantní, jsou to kmitočtové proudové řízení a kmitočtové napěťové řízení.

2.2.1.1 Kmitočtové - proudové řízení

Při tomto způsobu řízení se regulátorem proudu RI udržuje na zadané hodnotě proud I_l . změnou poměrného otevření střídače. Požadovaný kmitočet f_l je vypočten jako součet kmitočtu f , odpovídajícího rychlosti otáčení (daný měřením), a požadovaného skluzového kmitočtu f_2 , který je odvozen od zadaného tahu pohonu [1], [3].



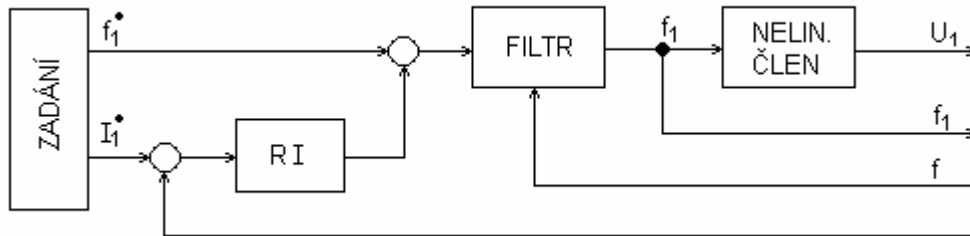
Obr. 2-3: Blokové schéma kmitočtové – proudového řízení

2.2.1.2 Kmitočtové – napěťové řízení

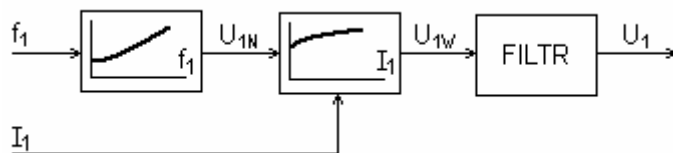
I při tomto způsobu řízení je udržován určitý vztah mezi satorovým napětím U_l a satorovou frekvencí f_l . Pro optimalizaci je potřeba tento vztah korigovat s ohledem na zatížení, charakterizované velikostí satorového proudu. Není zde třeba přesného měření rychlosti, protože kmitočet není součtem zadaného kmitočtu a kmitočtu a měřené rychlosti. Toto je sice zjednodušení celé úlohy, může mít ale špatný vliv na dynamické vlastnosti pohonu.

Podle zadaného zrychlení jsou určeny požadované satorové hodnoty (kmitočet a proud) ze strmosti jejich nárůstu. Žádané napětí je tvořeno v nelineárním členu (obr. 2-5) jako funkce kmitočtu s modifikováním satorového proudu. Nelineární člen je realizován ve dvou krocích: $U_{IN}=U_{IN}(f_l)$ pro jmenovité zatížení a $U_{IW}=U_{IW}(U_{IN},I_l)$ pro libovolné f_l .

Nelineárním členem se tedy zabezpečuje konstantní magnetický tok statoru. Zadaný kmitočet určuje otáčivou rychlost stroje s rozdílem, který je dán skluzem [1], [3]. Blokové schéma řízení je uvedeno na obr. 2-4.



Obr. 2-4: Blokové schéma kmitočtově – napět'ového řízení



Obr. 2-5: Znázornění nelineárního členu

2.2.2 Vektorové řízení

V dosavadních kapitolách o řízení asynchronních strojů se vycházelo ze vztahů pro ustálené vztahy nebo pro stavy s pomalým náběhem zatížení či otáčivé rychlosti. To ale neodpovídá praxi, kde jsou na pohony velmi často kladeny vysoké dynamické nároky.

2.2.2.1 Základní principy vektorového řízení

Základní snahou je, se vlastnostmi co nejvíce přiblížit stejnosměrnému pohonu s cizím buzením. Zde je poloha vektoru magnetického toku vázána se statorem (budícím vinutím) a jeho velikost je určena velikostí budícího proudu. Dále se reguluje proud do kotvy motoru a tím i moment na hřídeli. Obě složky – f_l a I_a – lze díky oddělenému napájení budícího vinutí a vinutí kotvy – řídit samostatně. Magnetomotorické napětí budícího vinutí F_b , úměrné budícímu proudu i_b , vytváří magnetický tok stroje a je proto nazýváno **tokotvornou složkou**. Magnetomotorické napětí kotvy F_a pak nazýváme **momentotvornou složkou**, jelikož je úměrné točivému momentu stroje [1], [2], [3].

V případě asynchronního motoru je třeba vycházet z náhradního schématu s oddělenými obvody (obr. 2-6) a jemu příslušnému vektorovému diagramu (obr. 2-7).

Pro popis schématu a diagramu zavedeme nové veličiny: reaktaci X a skluz s . Rovnice asynchronního stroje pak lze vyjádřit následovně:

$$U_1 = R_1 I_1 + jX_1 I_1 + jX_{1h} I_2 \quad a \quad (2-4)$$

$$U_2 = R_2 I_2 + jsX_2 I_2 + jX_{2h} I_1 = 0$$

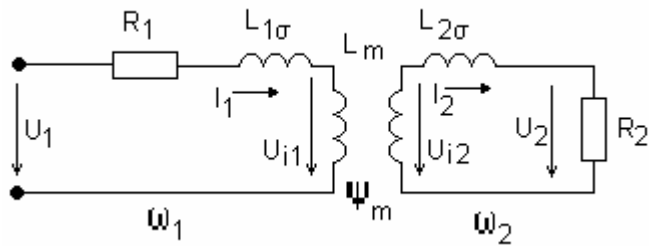
Zavedeme rozptylové indukčnosti $X_{1\sigma}$ a přepočteme rotorová napětí, proudy a vzájemné indukčnosti na stator jako u transformátoru (přepočítané hodnoty na stator obdrží další index: 1, vzájemná indukčnost je bez číselného indexu – X_h). Dostáváme tvar:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 I_1 + jX_{1\sigma} I_1 + jX_h (I_1 - I_{21}) \quad a \\ 0 &= R_{21} I_{21} + jsX_{21\sigma} I_{21} + jsX_h (I_1 - I_{21}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

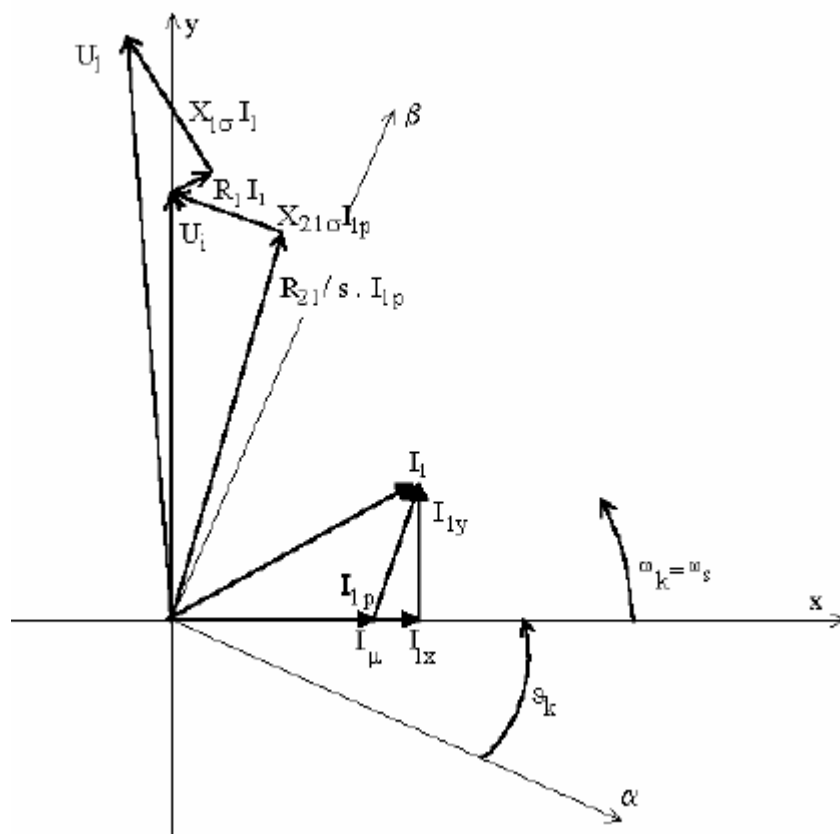
Po vydělení druhé rovnice ze soustavy rovnic (2-5) skluzem a zavedení pojmů indukované napětí, pracovní složka statorového proudu $I_{1p}=I_{21}$ a magnetizační proud $I_\mu=I_1-I_{21}$ dostáváme:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) + U_i \quad U_i = jX_h I_\mu \\ U_i &= I_{1p} (R_{21}/s + jX_{21\sigma}) - U_{21}/s \end{aligned} \quad (2-6)$$

Z těchto rovnic můžeme sestavit následující náhradní schéma i vektorový diagram.

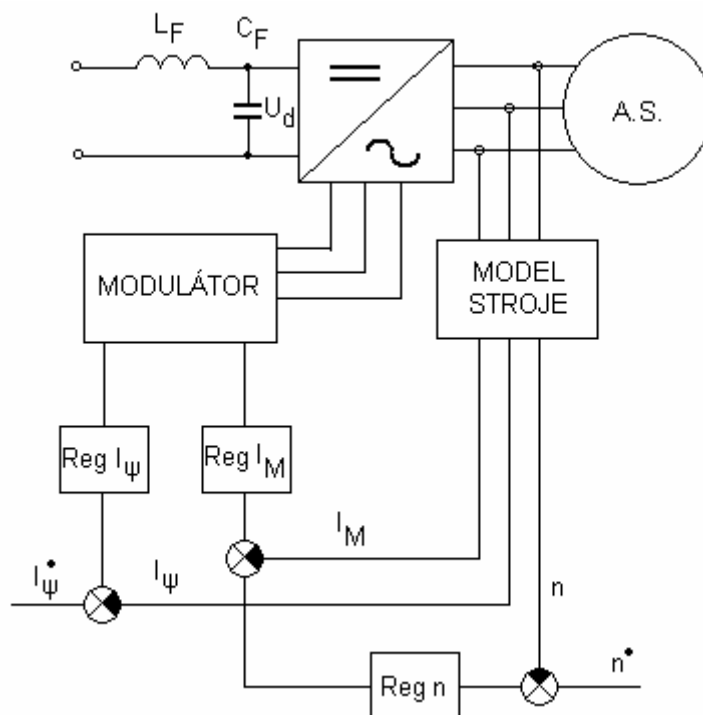


Obr. 2-6: Náhradní schéma asynchronního stroje



Obr. 2-7: Vektorový diagram

Schéma (obr. 2-8) představuje základní princip vektorového řízení pomocí frekvenčního měniče. Nejčastěji je u pohonů regulovanou veličinou otáčivá rychlost, avšak při sériovém řazení může být regulátor otáčivé rychlosti aplikován v jakémkoli systému kmitočtové regulace. Zde je použit matematický model nevyžadující měření otáčivé rychlosti. Výstupem následujícího výpočetního bloku je dokonce signál skutečné rychlosti pro její regulaci. Výstupy regulátorů statorového proudu pro momentotvornou složku (Reg. I_M) a tokotvornou složku (Reg. Ψ_M) musí odpovídat použitému modulačnímu algoritmu.



Obr. 2-8: Principiální schéma vektorového řízení

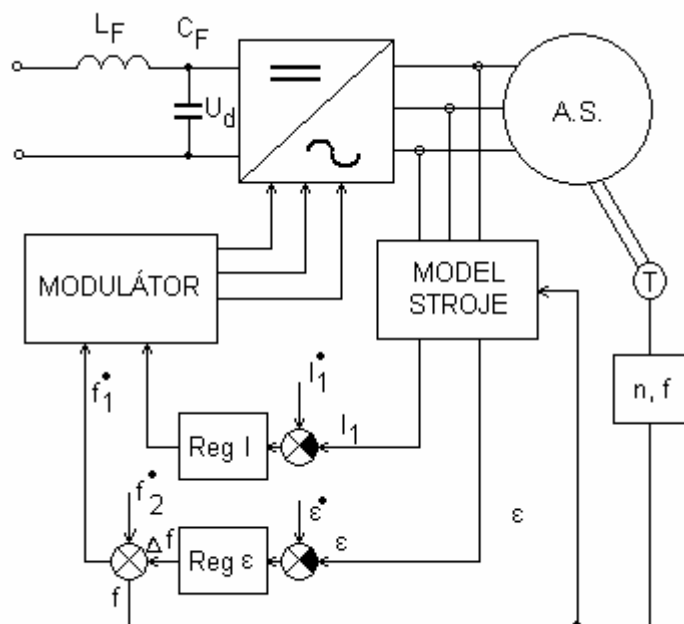
Moderní regulační struktury pohonů s asynchronním strojem pracují s jeho vnitřními veličinami, které lze prakticky získat pouze výpočtem. K tomu slouží počítačový model, který je založený na soustavě diferenciálních rovnic v elektromagneticko - mechanickém systému, který je podrobněji popsán v [1], strana 67 a další.

Vektorovou regulaci můžeme, podobně jako tomu bylo u skalární, rozdělit na dva typy: jsou to regulace proudového typu a napětového typu. Z hlediska této diplomové práce je významnější regulace napětového typu, neboť jí využívají řídicí jednotky pohonů, použité při laboratorních měřeních.

2.2.2.3 Vektorová regulace proudového typu

Hlavní regulovanou veličinou je modul statorového proudu asynchronního stroje. Je dán požadovanou hodnotou tokotvorné a momentotvorné složky. Z těchto dvou složek je pak v podstatě konstruován požadovaný prostorový vektor statorového proudu v polárních souřadnicích. Jeho modul se pak reguluje porovnáním s měřenou hodnotou v regulátoru proudu. Kmitočet je pak podobně jako u kmitočtové – proudového řízení součtem požadovaného a měřeného kmitočtu. Modulátor potom při zvoleném modulačním algoritmu generuje požadované hodnoty na základě proudu a frekvence. Další regulační smyčka reguluje úhel mezi prostorovými vektory rotorového magnetického toku a statorového proudu.

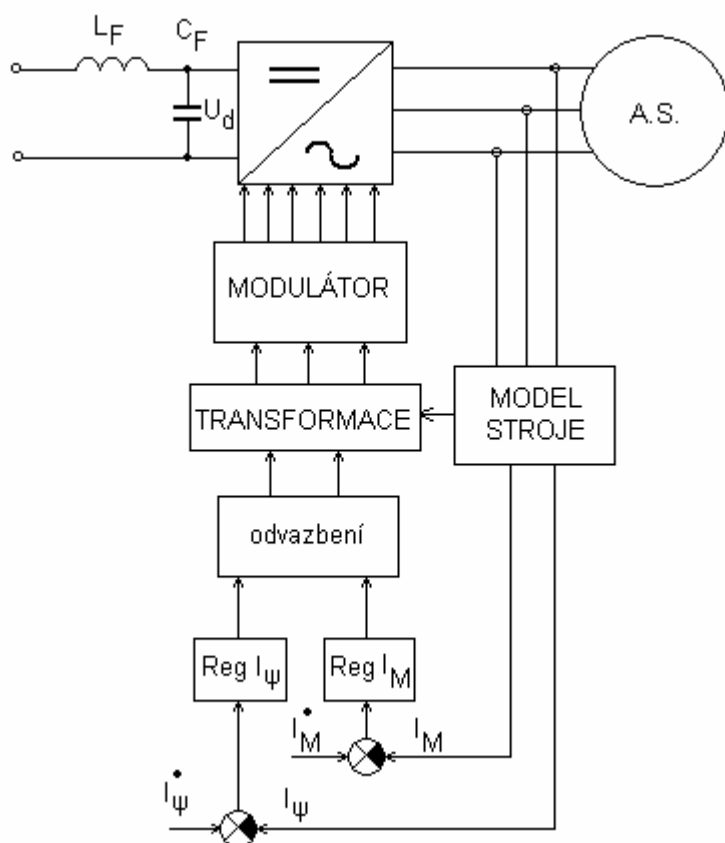
Jelikož se jedná o vektorovou regulaci, postačí pro určení vektoru proudu pouze modul a úhel. Skluzový kmitočet je tedy nadbytečný, ale používá se pro zpřesnění regulace. Zablokováním regulace úhlu bychom dosáhli režimu skalárního řízení.



Obr. 2-9: Schéma vektorové regulace proudového typu

2.2.2.4 Vektorová regulace napět'ového typu

Pojmenování tohoto typu vychází z faktu, že dominantní akční veličinou je požadované napětí pro modulátor. Nese v sobě informaci o poměrném otevření střídače, zadaném kmitočtu, ale i fázi tohoto napětí. Regulace probíhá v pravoúhlých souřadnicích rotujících synchronně s magnetickým polem v asynchronním stroji, proto je prvotně důležitou veličinou transformační úhel (úhel mezi osou d a q – viz obr.2-7). Ten získáme buď integrací úhlové rychlosti nebo použitím složky rotorového magnetického toku, které po své normalizaci modulem toku určují přímo goniometrické funkce úhlu. Za chodu motoru je pomocí měřených hodnot (fázové a sdružené hodnoty napětí a proudů, otáčky) a matematického modelu zkonstruován prostorový vektor rotorového magnetického toku, který určuje úhel pro rozložení statorového proudu na tokotvornou a momentotvornou složku. Tyto složky se regulují v příslušných regulátorech a z jejich výstupních hodnot je pak vytvořen prostorový vektor výstupního napětí střídače. Výhodou této regulace, znázorněné na obr. 2-10, je dobrá dynamika.



Obr. 2-10: Schéma vektorové regulace napět'ového typu

Vektorovou regulaci napět'ového typu využívá také měnič Simovet Masterdrives, který řídí asynchronní motor.

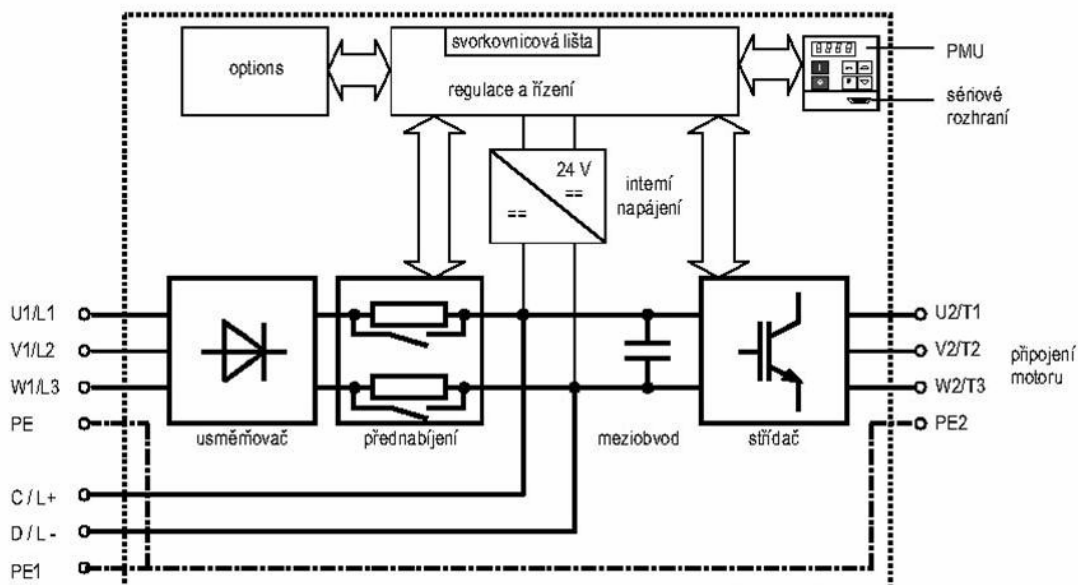
3 Frekvenční měniče

Frekvenční (kmotočtové) měniče jsou zařízení, která slouží k přeměně elektrického proudu s určitým kmitočtem na elektrický proud s jiným kmitočtem. Používají se tedy jako zdroje proměnného kmitočtu pro řízení asynchronních strojů. Měnič se skládá z usměrňovače a střídače, které jsou propojeny stejnosměrným meziobvodem, sloužícím k filtraci stejnosměrného proudu před střídačem. Střídavé napětí je přivedeno na usměrňovač, kde je v trojfázovém můstku usměrněno a přivedeno přes stejnosměrný meziobvod na střídač. Vývoj měničů rostl s vývojem polovodičových součástek – tranzistory, diody, tyristory. Moderní frekvenční měniče, jako jsou například pro účely této diplomové práce použité měniče od firmy Siemens obsahují navíc elektronickou regulaci uvedených bloků, interní napájení těchto regulačních obvodů a možnost propojení s počítačem.

3.1 Frekvenční měniče firmy Siemens

V laboratoři katedry elektrotechniky, kde je realizována experimentální část této práce jsou pohony napájeny frekvenčními měniči firmy Siemens. Konkrétně pro asynchronní motor je to měnič SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control v kompaktním provedení. Pojem kompaktní provedení znamená to, že obvody elektroniky jsou napájeny pomocí vestavěného napájecího zdroje, který je napájen ze stejnosměrného meziobvodu (viz obr. 3-1). V tomto provedení zaujímají měniče firmy Siemens výkonové spektrum od 2,2 kW do 37 kW. Použitý frekvenční měnič mění třífázové síťové napětí s pevnou frekvencí (50/60 Hz) na třífázový točivý systém napětí s možností plynule měnit hodnotu výstupního napětí a frekvence výstupního napětí. Lze tak snadno řídit otáčky připojeného motoru od nuly až po hodnotu otáček odpovídající frekvenci výstupního napětí 600 Hz.

Střídavé napětí přivedené na vstupní svorky měniče se usměrní v třífázovém můstku a přes přednabíjecí obvody se přivádí na kondenzátor umístěný v napětřovém meziobvodu. Střídač pak vytvoří ze stejnosměrného napětí metodou pulsně šířkové modulace (PWM) třífázový systém střídavého napětí s měnitelnou frekvencí v rozsahu 0 – 600 Hz. Detailní popis měniče najdeme v jeho návodu k obsluze a údržbě [5].



Obr. 3-1: Blokové schéma zapojení frekvenčního měniče

Měnič je v laboratoři připojen z hlediska elektromagnetické kompatibility (EMC – electromagnetic compatibility), jak je blíže uvedeno v [5] na straně 6-1.

3.1.1 Regulační módy měniče Simovert Masterdrives

Měnič SIMOVERT MASTERDRIVES Vector control umožňuje uživateli výběr módu řízení a regulace. Lze vybírat z následujících šesti, přičemž první tři jsou skalární a druhou trojici tvoří vektorové typy řízení:

- Řízení dle charakteristiky U/f , regulace otáček s impulsním čidlem otáček
- Řízení dle charakteristiky U/f
- Řízení dle charakteristiky U/f pro aplikace v textilním průmyslu
- Vektorové řízení bez čidla otáček (regulace f)
- Vektorové řízení s čidlem otáček (regulace n) - regulace otáček s impulsním čidlem otáček
- Vektorové řízení s čidlem otáček (regulace M) – regulace momentu s impulsním čidlem otáček

Pro účely této práce, jak už je jí název „Střídavý pohon s regulací na konstantní moment“ napovídá, je vhodný poslední způsob řízení. Tedy regulace momentu s impulsním čidlem otáček. Mód řízení se nastavuje při parametrizaci měniče (viz další kapitola).

3.1.2 BICO technologie

Všechny veličiny a signály v měniči jsou prezentovány pomocí číslicových signálů ve formátu boolean nebo word. Tyto číslicové signály jsou získávány pomocí A/D převodníků ze signálů analogových. Každý signál má pak v celém systému měniče jedinečné označení, což usnadňuje orientaci v označení a ve schématech. Je možné jednoduše popsat zdroj signálu a cílový blok, se kterým má být signál spojen.

Technologie se nazývá BICO. Tento název je odvozen ze slov binector a conector, přičemž conector (česky konektor) představuje analogový signál. Může být 16-bitový nebo 32-bitový.

Binector (binektor) reprezentuje digitální signál nabývající hodnot logická jednička nebo nula.

Tab. 3-1: Seznam druhů signálů v měniči

Označení	Typ	Popis
Bxxxx	Binektor	Volně přepojovatelný binární signál (hodnoty log.1 a 0)
Kxxxx	Konektor	Vonlě přepojovatelný 16-ti bitový signál
KKxxxx	Dvojitý konektor	Volně přepojovatelný 32bitový signál



Obr. 3-2: Značení signálů BICO technologie

3.1.3 Parametry a parametrování měniče Simovert Masterdrives

Parametry slouží k přizpůsobení měniče na konkrétní podmínky aplikace, kterou ovládá. Každý parametr je jednoznačně určen svým názvem a číslem. Některé parametry jsou pak rozšířeny o index, který umožňuje přiřazení více hodnot jednomu parametru.

Parametry můžeme dle jejich funkce rozdělit do dvou skupin:

1. parametry, jejichž hodnoty lze měnit – označené velkými písmeny (P, U, H, L)
2. parametry monitorovací, jejichž hodnoty lze jen číst – malá písmena (r, n, d, c)

Příklad parametru: Zwischenkreisspg r006 = 541 – (z němčiny: Zwischenkreisspannung - napětí v meziobvodu):

Tab.: 3-2: Položky parametru bez indexu

Jméno parametru	Zwischenkreisspg
Číslo parametru	r006
Index parametru	nemá
Hodnota parametru	541 V

Parametr s indexem by pak vypadal takto: P554.2 = 20. Index se tedy píše za tečku – zde číslice 2.

Pod pojmem parametrování rozumíme nastavení parametrů měniče.

Celý proces parametrování lze rozdělit do následujících kroků:

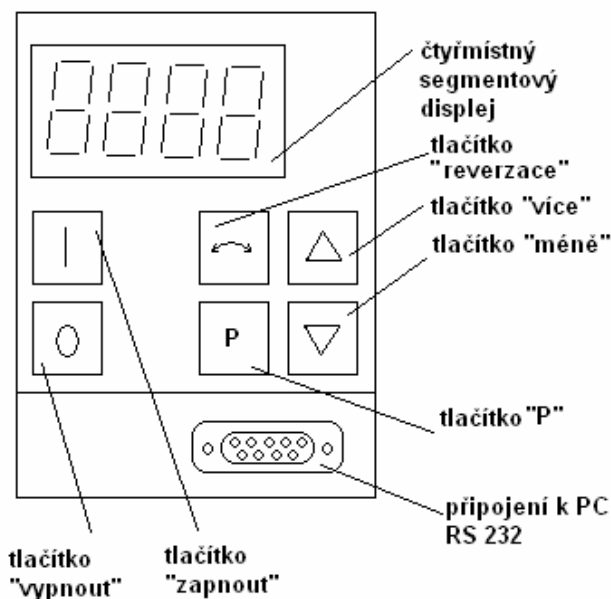
1. definice silové části
2. definice jednotek
3. definice pohonu
4. přizpůsobení funkcí

Přičemž se nemusí vždy detailně procházet všechny tyto kroky. Parametrování lze pak zhrnout a zkrátit použitím rychlého postupu, tzn. použitím přednastavených parametrů od uživatele nebo továrního nastavení parametrů.

Měnič SIMOVERT MASTERDRIVES umožňuje tři způsoby parametrování:

1. Parametrizace pomocí takzvané parametrizační jednotky PMU (parametrisation unit)
2. Parametrizace pomocí ovládacího panelu OP1S
3. Parametrizace pomocí osobního počítače a softwaru Simovis nebo Drivemonitor

Frekvenční měnič SIMOVERT MASTERDRIVES, použitý v laboratoři k napájení asynchronního motoru i řídicí jednotka SIMOREG pro stejnosměrný motor obsahují PMU. Parametrování pomocí této jednotky je ale zdlouhavé. Ke každému parametru se musí přeskakovat a na displeji jednotky je zobrazen vždy pouze jeden parametr.



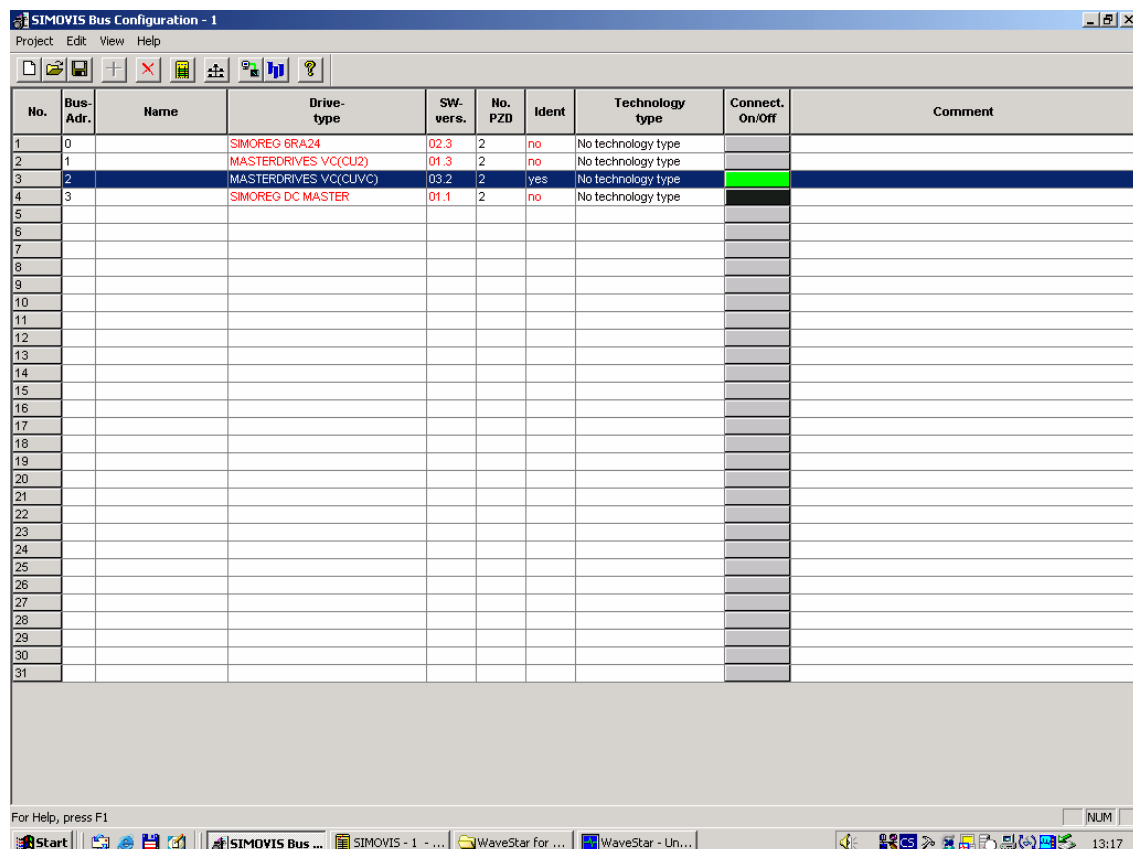
Obr. 3-3: Jednoduchý ovládací panel – PMU

Nejpohodlnějším způsobem parametrování měniče je pomocí vhodného programu (Simovis, Drivemonitor) na PC přes kabel s rozhraním RS 232. Počítač v laboratoři je vybaven programem Simovis i Drivemonitor. Pro účely měření byl použit první jmenovaný.

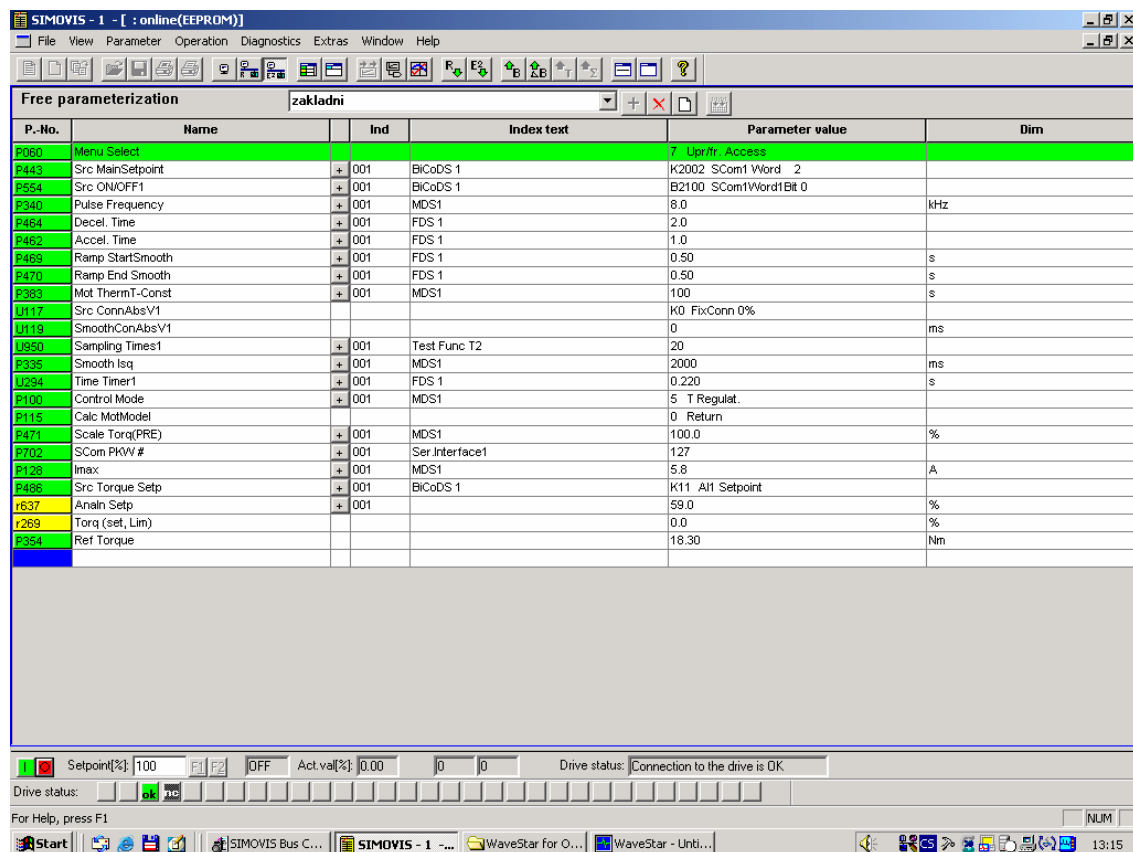
3.1.3.1 Obsluha a parametrování pomocí programu Simovis

Program Simovis je nainstalován na laboratorním počítači. Jsou na něm nastaveny všechny pohony, které se používají v laboratoři. Pro účel této práce budeme pracovat s dvěma pohony. Budeme tedy ovládat jednotku Simovert, která napájí hnaný asynchronní motor a jednotku Simoreg, která reguluje hnací stejnosměrný motor.

Po spuštění aplikace Simovis (C:\Program Files\Masterdrives\simovis.exe) se na monitoru zobrazí okno (viz. Obr. 3-4) s možností výběru pohonu. Pohon, který je v tu chvíli připojen přes rozhraní RS232 k počítači má za názvem zeleně vybarvené pole, které hlásí připojení k systému. Dvojklikem na název pohonu nebo jeho označením a následným kliknutím na ikonku s názvem „parametrize drive“ (parametrizuj pohon) se zobrazí nové okno (viz. Obr. 3-5) s parametry vybraného pohonu. Ty jsou díky mnohým předchozím měřením uspořádány do přehledných skupin (v obr. 3-5 je to skupina „zakladní“). Dvojklikem na hodnotu parametru se zobrazí okno s možností editace hodnoty a u některých parametrů i s mezemi danými výrobcem.



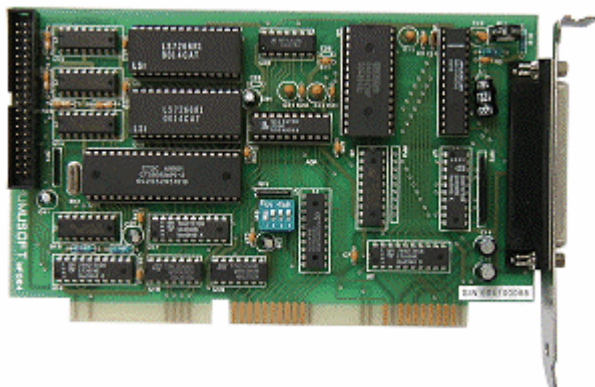
Obr. 3-4: program Simovis – výběr pohonu



Obr. 3-5: program Simovis – parametrizace pohonu

4 Multifunkční karta Humusoft MF 604

Multifunkční vstupně-výstupní karta Humusoft MF 604 je vhodná jak pro laboratorní, tak i pro průmyslové užití. Je určena pro měření stejnosměrných napětí, řízení a monitorování procesů, vícekanálový sběr dat, simulaci v reálném čase, měření frekvence a času, atd. [6].



Obr. 4-1: Multifunkční karta Humusoft MF 604

Karta je podporována produktem Extended Real Toolbox, který spolupracuje jako knihovna s programem Matlab Simulink.

Pro účely této práce byla karta využita k simulaci různých průběhů momentového zatížení (viz. 5.3 Měření schopnosti motoru reagovat na požadovaný průběh momentu)

Vlastnosti a parametry multifunkční karty jsou uvedeny v příloze B této publikace.

4.1 Používání multifunkční karty v prostředí Matlab Simulink

Pro používání karty je třeba mít nainstalován program Matlab s rozšířením Simulink a balík Extended Real Time Toolbox pro tento program. Software je dodáván spolu s kartou.

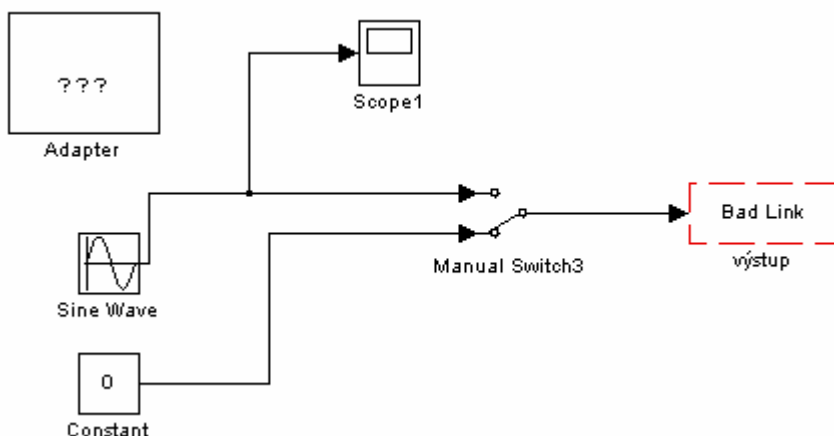
V samotném prostředí Simulinku přetáhneme do vytvořené úlohy blok „Adapter“ znázorňující kartu a nastavíme vlastnosti a ovladač pro daný typ. V našem případě je to soubor s názvem *mf604.rtd*.

Používání karty k účelům této práce:

Užití analogových výstupů: Pomocí knihoven v Simulinku byly vytvořeny signály s určitou

frekvencí. Po nastavení délky simulace a jejím spuštění se signál přenesl na výstupy karty.

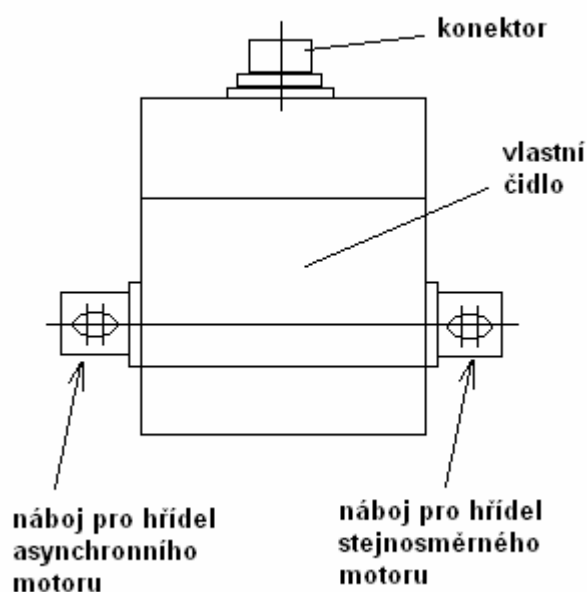
Na obr. 4-2 je uveden příklad generování sinusového signálu pomocí karty MF 604 v programu Matlab Simulink.



Obr. 4-2: Použití karty Humusoft MF 604 v Simulinku

5 Momentové čidlo

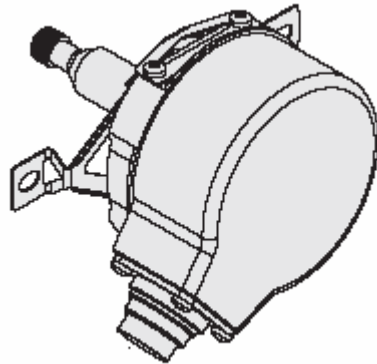
Hřídele obou strojů (asynchronního a stejnosměrného) jsou spojeny spojkou a momentovým čidlem TQ503 R-20 od firmy OMEGA Engineering inc. [9]. Tento typ momentového čidla umožňuje měřit moment při obou směrech otáčení hřídele. Čidlo ale nepracuje správně (poškození předchozími měřeními) a bylo pro účely této práce použito pouze jako spojka obou hřídelí.



Obr. 5-1: Schematické znázornění momentového čidla v laboratorním pohonu

6 Otáčkové IRC čidlo

Pro snímání otáček na asynchronním motoru je určeno IRC čidlo od firmy Siemens s označením 1XP8001-1 (obr. 6-1) přimontované přímo na motoru.



Obr. 6-1: IRC čidlo

Čidlo měří rychlost otáčení asynchronního motoru ve 1024 impulsech za otáčku a posílá tyto údaje do frekvenčního měniče Simovert Masterdrives, kde se otáčky spolu s dalšími měřenými veličinami vyhodnocují.

Čidlo pracuje správně, jeli splněn požadavek výrobce, daný rovnicí (6-1).

$$n[\text{min}^{-1}] = \frac{f_{\text{max}}[\text{kHz}]}{Z} * 10^3 * 60[\text{min}^{-1}] \quad (6-1)$$

, kde Z je počet impulsů (1024) a f_{max} maximální frekvence, kterou bude pohon napájen.

Tuto podmínku laboratorní pohon splňuje.

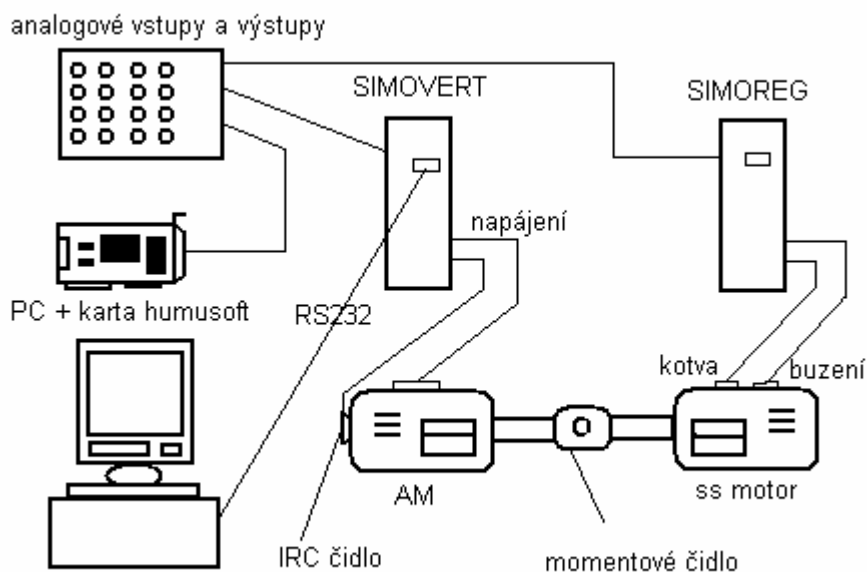
Podrobnější informace k čidlu, k jeho správné montáži a korektnímu užívání jsou uvedeny ve firemních dokumentech firmy Siemens, dostupných na internetových stránkách [8].

7 Experimentální část

Tato část práce popisuje pracoviště s pohony (laboratoř EL2 na Technické univerzitě) a zabývá se zároveň měřením uvedeným v zadání diplomové práce. Měření můžeme rozdělit na tři části. První část tvoří seznámení s pracovištěm a základní měření skoku momentu na požadovanou hodnotu. Dále je to pak zjištění vlivu nastavení proudového regulátoru na stavy asynchronního motoru a třetí část se zabývá schopností měniče uregulovat motor na požadovaný průběh momentu, zadávaný z Matlabu Simulink.

7.1 Laboratoř s pohony EL2

Na obrázku 7-1 je znázorněno ideové schéma měřicího pracoviště, obsahující oba motory (hnací stejnosměrný a hnaný asynchronní), jejichž hřídele jsou propojeny momentovým čidlem, k nim řídicí jednotky (frekvenční měnič Simovert Masterdrives a řídicí jednotka Simoreg) a desku s digitálními a analogovými vstupy a výstupy pro připojení v Matlabu realizované zátěže do měniče. Aktuální otáčky pak posílá IRC čidlo přímo do měniče. Zde jsou zpracovávány a spolu s požadovanými veličinami (proudy, napětí, frekvence, atd.) vyhodnocovány. Obě řídicí jednotky jsou s počítačem propojeny kabelem přes rozhraní RS232. Počítač navíc obsahuje měřicí kartu Humusoft MF 604, která slouží k realizaci připojení zátěže. Fotodokumentace k pracovišti je v příloze B.



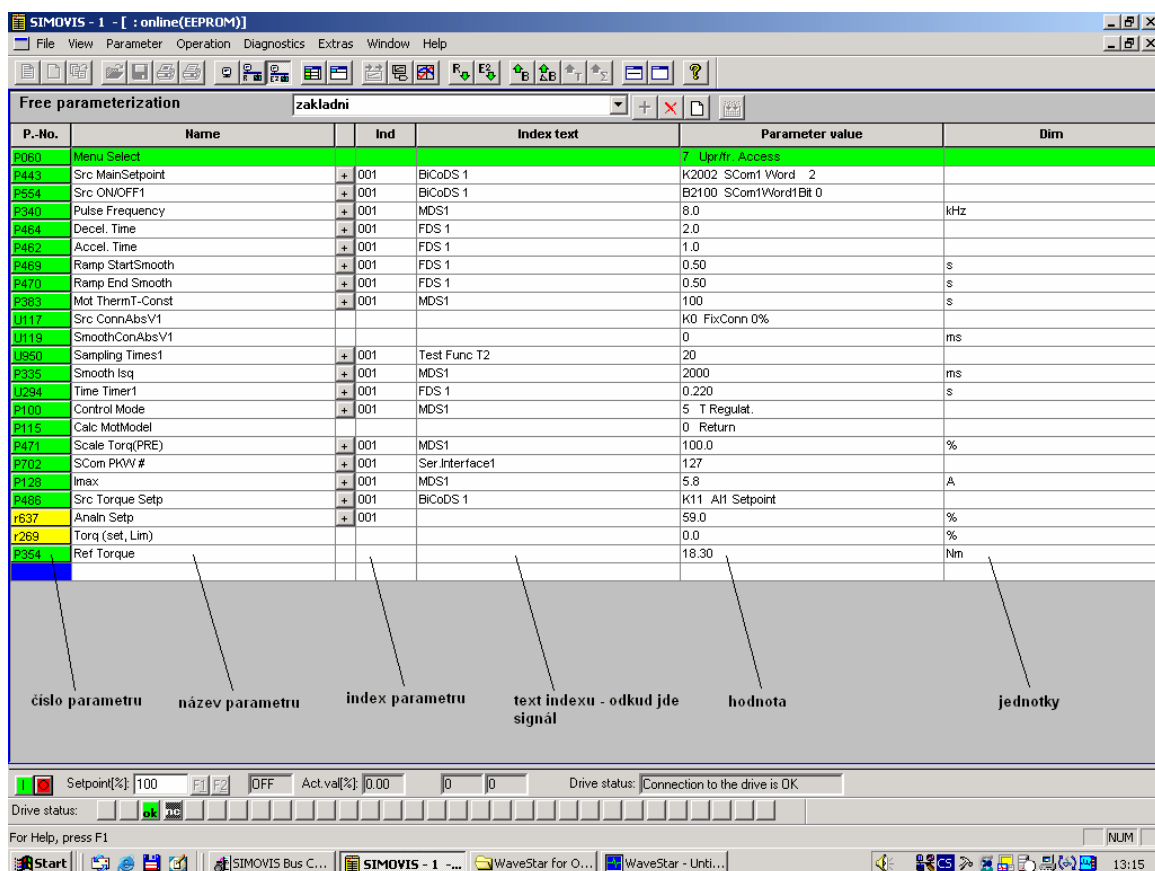
Obr. 7-1: Ideové schéma zapojení pohonu v laboratoři EL2

7.2 Uzpůsobení pracoviště pro měření momentu

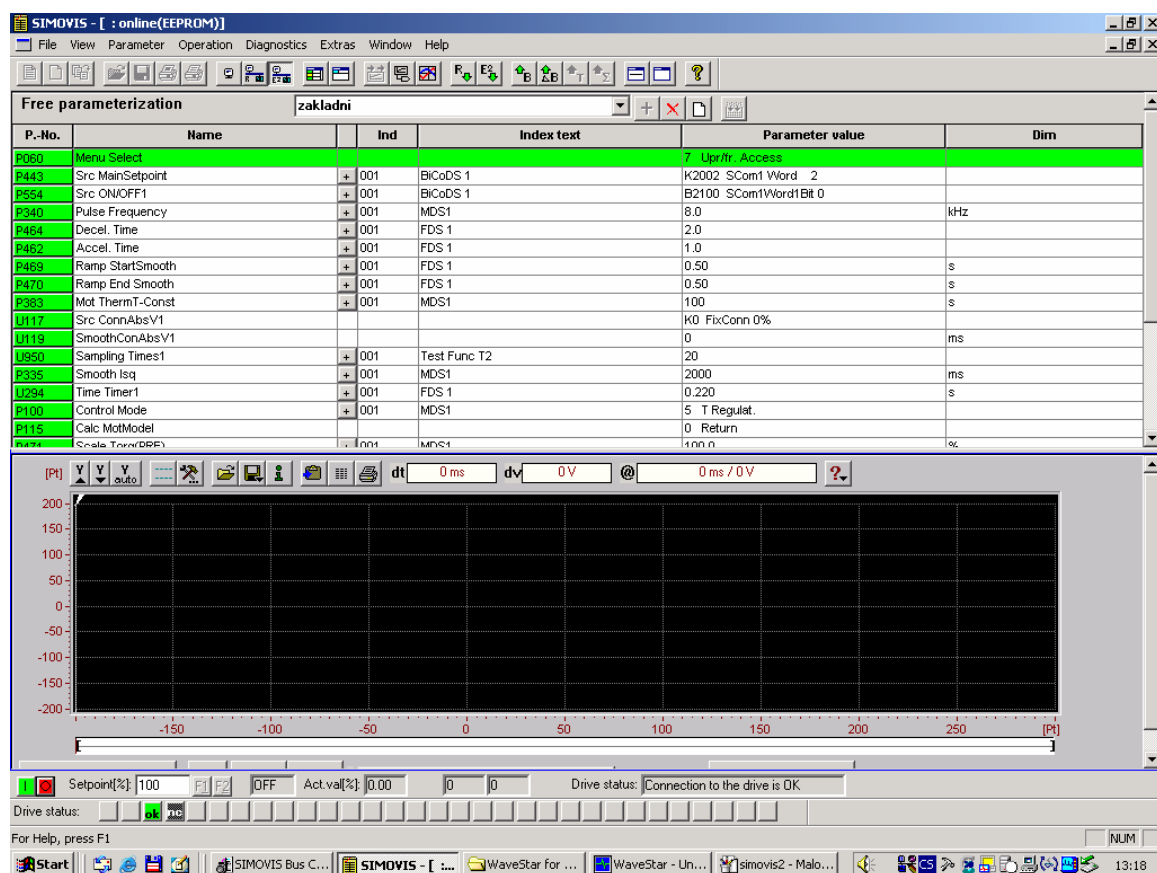
Z hlediska měření požadovaných hodnot je pro tuto práci směrodatný frekvenční měnič Simovert Masterdrives, který napájí asynchronní motor. Všechna měření se provádějí pomocí něj, tzn. i všechny charakteristiky jsou měřeny a vyhodnocovány tímto měničem ve spolupráci se softwarem Simovis.

Pro vlastní měření byl vytvořen soubor parametrů, umožňující jednoduše měnit nastavení měniče a zároveň reprodukovat shodné podmínky měření. Před měřením byla provedena optimalizace měniče – nastavení parametrů na hodnoty doporučené výrobcem pro daný pohon. Nastavení měniče je popsáno v kapitole 3 této práce a podrobně pak v návodu k měniči [5]. Veškeré měření v této práci bylo provedeno v režimu vektorového řízení s čidlem otáček (regulace momentu). K tomu byl změněn parametr P100 na hodnotu 5 a nastaven parametr pro IRC čidlo P130 na hodnotu 11.

Měnič je parametrován komfortně z programu Simovis. Tentýž program pak vyhodnocuje a zobrazuje požadované naměřené hodnoty pomocí funkce trace - lze si představit jako osciloskop. Ukázka parametrování je na obrázku 7-2, trace je zobrazen na obrázku 7-3.



Obr. 7-2: Parametry pohonu v Simovisu s popisky



Obr. 7-3: Rozdělená obrazovka Simovisu – parametry a trace

Všechny měřené hodnoty jsou v programu Simovis na osciloskopu zaznamenávány a zobrazeny v % k referenčním parametrům. Referenční parametry tvoří v podstatě štiťkové údaje obou motorů.

Jediným důležitým parametrem stejnosměrného pohonu pro účely této práce jsou jeho otáčky, jelikož louží jako hnací pohon. Referenční hodnota otáček byla nastavena na 1000 ot/min.

Referenční parametry zadané v Simovisu pro asynchronní pohon jsou spolu s číslem a názvem parametru uvedeny v následující tabulce:

Tab. 7-1: Referenční hodnoty asynchronního stroje

Veličina	Parametr	Číslo parametru	Referenční hodnota
Proud	RefAmps	P350	3,9 A
Napětí	RefVolts	P351	400 V
Frekvence	RefFrequency	P352	50 Hz
Otáčky	RefSpeed	P353	1000 min ⁻¹
moment	RefTorque	P354	18,3 Nm

7.3 Základní měření skoku momentu

V tomto měření, které sloužilo zejména k seznámení se s pracovištěm, byly realizovány různé skokové změny momentu při otáčkách stejnosměrného stroje 100% a 50%.

7.3.1 Nastavení motorů pro měření

Pro zadání této hodnoty připojíme kabel s rozhraním RS232 od počítače k jednotce Simoreg a nastavíme položku Setpoint [%] (viz obr. 7-4) v dolní části okna parametrizace na 100. Nastavujeme tím 100% jmenovitých otáček, tedy 1000 ot/min.



Obr. 7-4: Nastavení otáček stejnosměrného motoru

Stejnsměrný motor pak spustíme přes spínače na desce analogových a digitálních vstupů a výstupů. Použijeme k tomu tři spínače digitálních vstupů (DI – digital input):

- Logická 1 na vstupu DI2 spustí buzení motoru
- Logická 1 na vstupu DI3 odbrzdí stejnosměrný motor
- Vstup DI1 je nastaven k přepínání rychlosti otáčení:
 - log. 1 odpovídá 100% jmenovitých otáček
 - log. 0 odpovídá 50% jmenovitých otáček

Nastavení hodnoty 50% na DI1 se provede parametrem P431. Ten se nastaví na 50%.

Díky těmto digitálním vstupům nepotřebujeme ke spouštění motoru program Simovis a můžeme tedy počítač spojit s frekvenčním měničem pohánějící asynchronní pohon, kde je zapotřebí zadávat požadované skoky momentu.

Moment zadáváme opět do položky Setpoint [%] (viz zadávání otáček v Simoregu).

Nastavení osciloskopu:

Nastavení osciloskopu provedeme pomocí tlačítka „Settings“ (obr. 7-5). Nastavíme zde požadované měřené signály z měniče (tab.7-2) a funkci trigger, resp. pretrigger. Tato funkce slouží k časovému uspořádání měření – jednoduše řečeno, aby program věděl, kdy má začít vykreslovat. Trigger byl nastaven na 70% měřeného momentu. To znamená, že jakmile se dosáhne 70% celkového měřeného momentu, tak začne trace vykreslovat signál. Kdyby bylo měření nastaveno pouze takto, byly by pak všechny grafy zobrazovány až od této hodnoty, což je nežádoucí, protože by nebyl vidět celý skok momentu a reakce ostatních veličin v plné míře. Pro zobrazení signálu před

dosažením hodnoty 70% momentu slouží položka pretrigger. Ta byla zvolena 20%. To znamená, že 20% celkového času záznamu je před hodnotou 70% momentu. Tato hodnota je plně postačující pro zobrazení skokových změn v následujících měřeních.



tlačítko nastavení tlačítko pro spuštění měření

Obr. 7-5: Detail okna trace

Tab. 7-2: Veličiny zaznamenávané při měření skoku momentu

Veličina	Konektor	Význam
Motor Torque	K0024	Moment motoru
Meas'dRot.Speed	KK0091	Měřené otáčky přímo z IRC čidla
U(set,abs)	K0189	Napětí na výstupu měniče
Isd(act)	K0182	Momentotvorná složka proudu
Isq(act)	K0184	Tokotvorná složka proudu
OutputAms(rms9)	K0242	Celková hodnota výstupního proudu
f(set,stator)	KK0199	Statorová frekvence

Postup při měření je pak následovný:

1. sepnutí spínače DI2 (buzení ss. motoru)
2. sepnutí spínače DI3 (odbrždění motoru)
3. stisknutí tlačítka start v okně trace (obr. 7-5)
4. zadání požadované hodnoty momentu do položky Setpoint [%] (obr. 7-4)

Po provedení těchto kroků se začnou v okně trace vykreslovat požadované průběhy.

V pravé části obrazovky si lze zaškrtnutím políčka u názvu datové řady vybrat, které

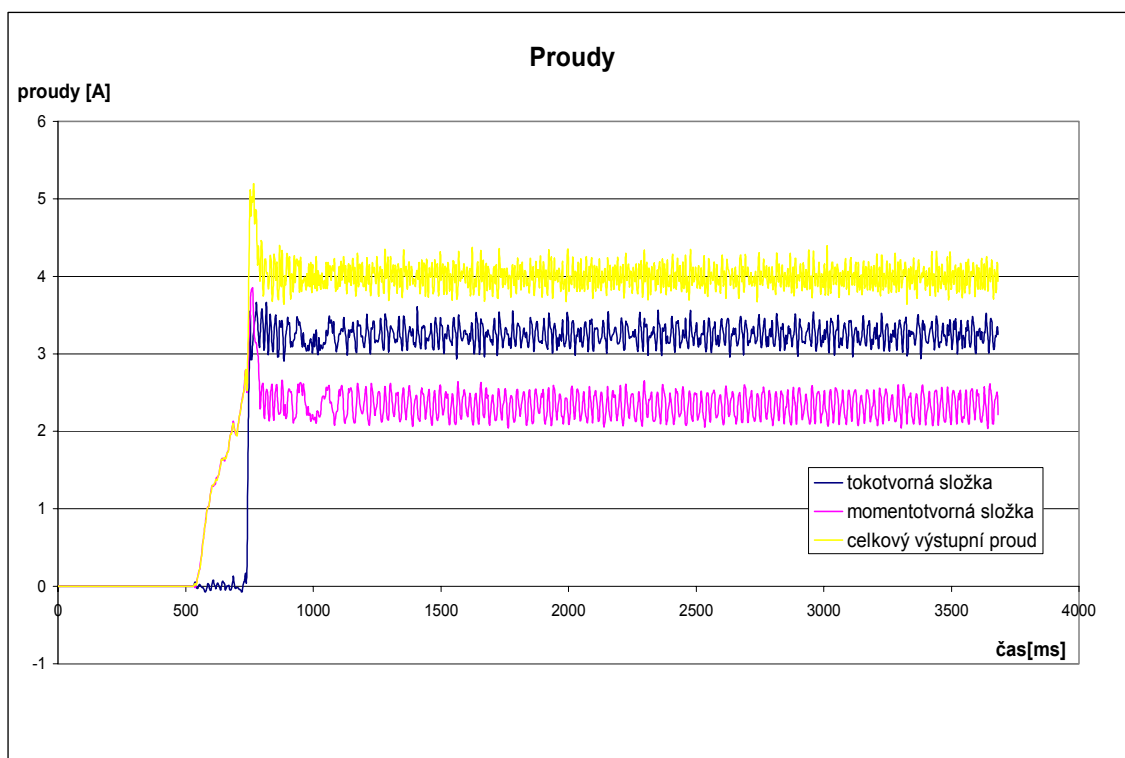
průběhy mají být zobrazeny. Trace také umožňuje pracovat s časovou ostou – zobrazení určitého časového úseku. Tyto a další možnosti jsou podrobně popsány v Kompendiu k měniči Simovert Masterdrives [4].

Zobrazené grafy, respektive jejich datové řady lze uložit ve formátu *.trc (formát dat pro program Simovis) nebo jako textový dokument ve formátu *.txt. Kvůli zpracování grafů, byly všechny naměřené grafy uloženy jako textový dokument a v programu Microsoft Excel upraveny (převod všech veličin z procent na skutečné rozměry a úprava časové osy) a převedeny do formátu *.xls.

Vzhledem k vysokému počtu měření jsou v každé kapitole uvedeny pouze některé naměřené průběhy. Všechny průběhy ve formátu *.xls a data ve formátu *.txt jsou uloženy na přiloženém kompaktním disku.

7.3.2 Naměřené hodnoty

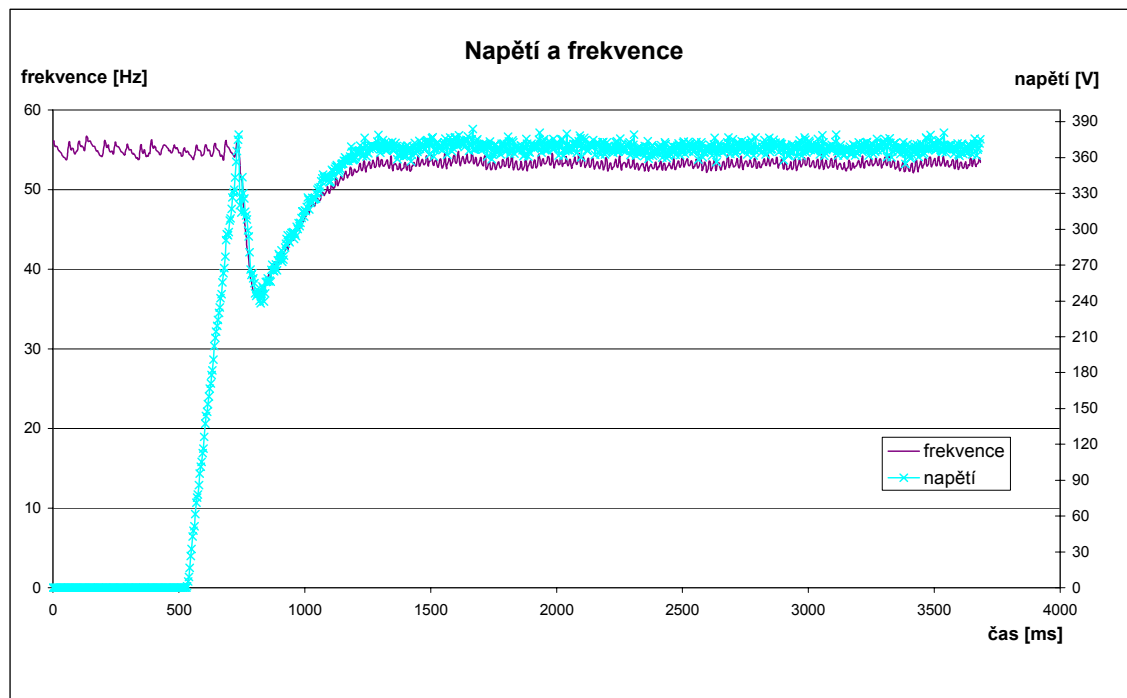
Uvedeny jsou průběhy měření skoku momentu z nuly na 100% jmenovitého momentu při 100% otáček stejnosměrného motoru.



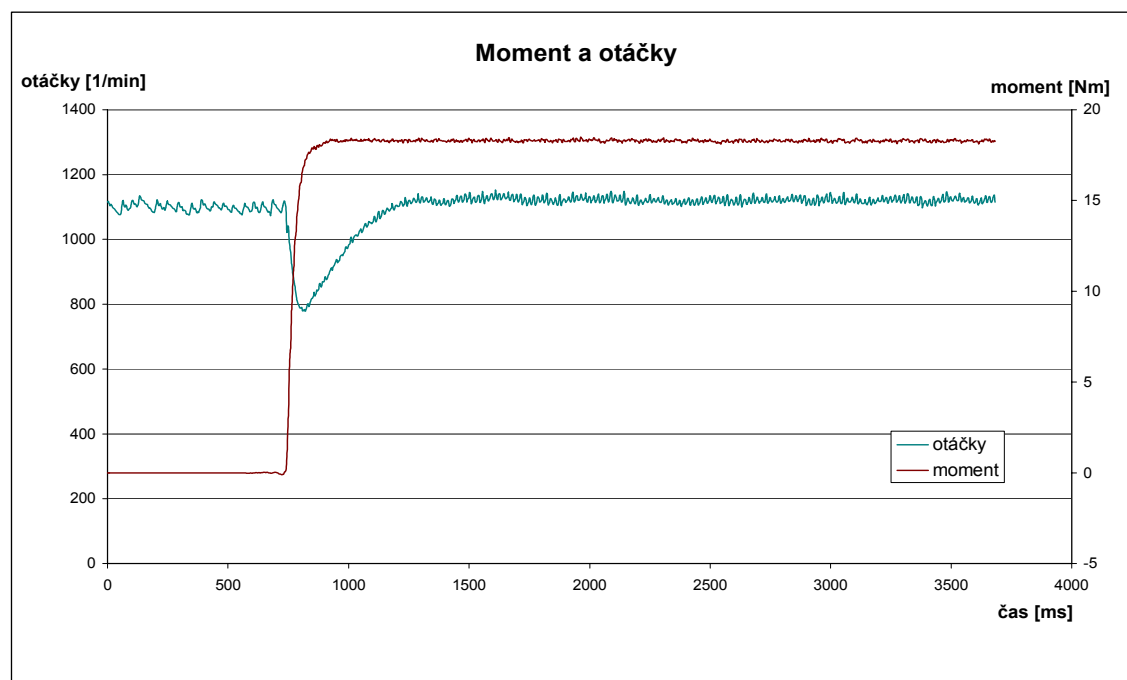
Obr. 7-6: Proudy při měření skoku momentu z 0 na 100%

Vektor celkového výstupního proudu I je tvořen právě tokotvornou I_{sq} a momentotvornou složkou I_{sd} . Přesně tedy jejich vektorovým součinem. Pro velikost (absolutní hodnotu vektoru) pak platí:

$$\sqrt{I_{sq}^2 + I_{sd}^2} = I \quad (7-1)$$



Obr. 7-7: Napětí a frekvence při měření skoku momentu z 0 na 100%



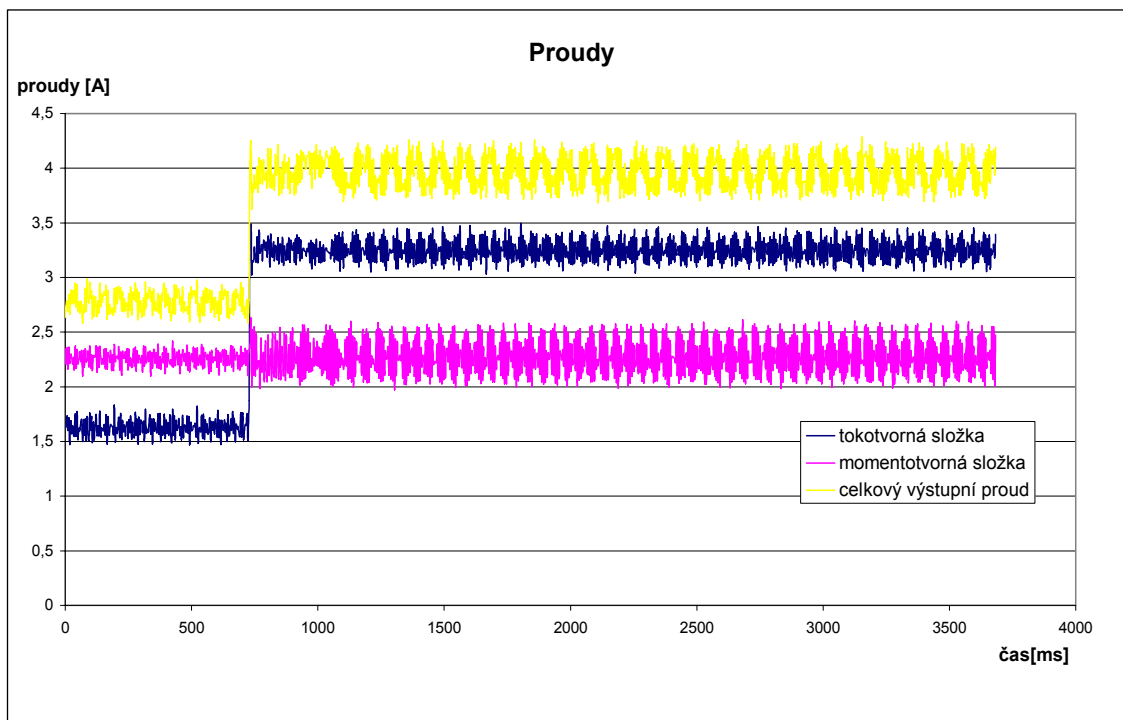
Obr. 7-7: Moment a otáčky při měření skoku momentu z 0 na 100%

Při požadavku na skok momentu začne frekvenční měnič napájet asynchronní motor. Poté co se dosáhne jmenovité hodnoty napájení (ca. 400 V) může měnič začít realizovat skok momentu. Ten se projeví poklesem napětí, se kterým je spojen i pokles frekvence, a samozřejmě i poklesem otáček, než se pohon zase ustálí. Konstantní moment je pak udržován s ustálenými hodnotami otáček, napětí a frekvence.

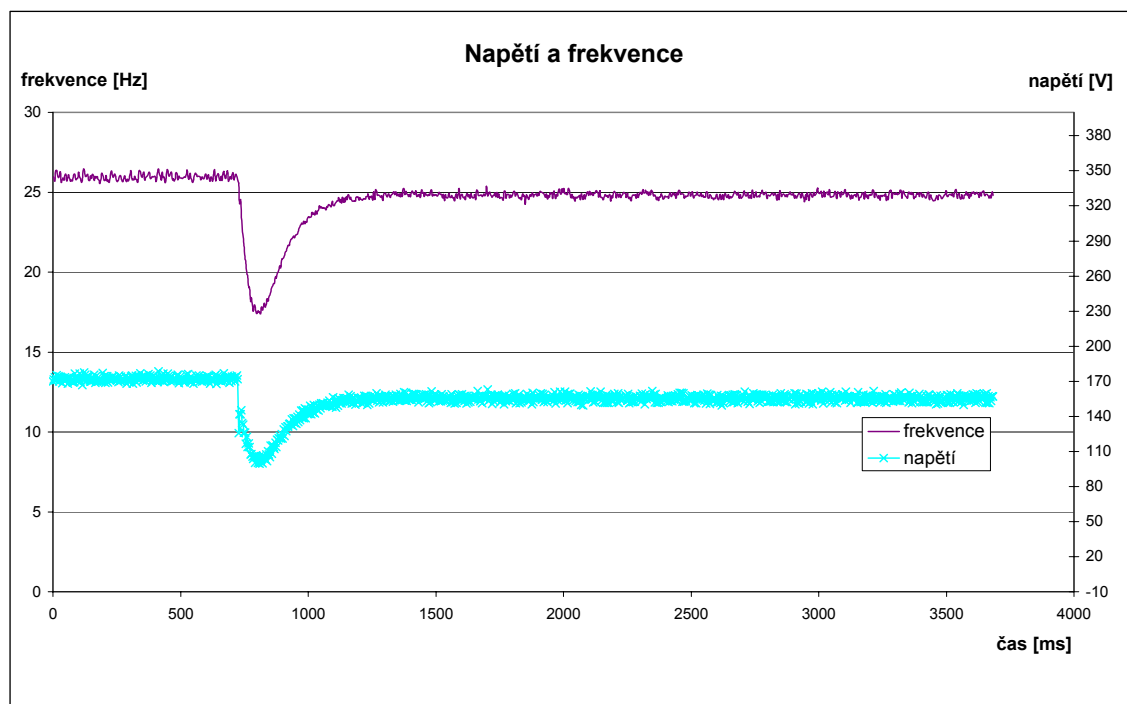
Již při tomto měření vyšla najevo nesrovnalost hodnoty otáček. Na stejnosměrném stroji bylo totiž nastaveno 100% jmenovitých otáček, což by odpovídalo hodnotě kolem 1000 otáček za minutu. Naměřená charakteristika však vykazuje střední hodnotu otáček ca. 1100.

Po diskuzi s konzultantem a vedoucím práce byl stanoven závěr, že tato odchylka je způsobena špatnou kalibrací stejnosměrného motoru. Jeho řídicí jednotka totiž nedostává signál o okamžité hodnotě otáček, jak je tomu u frekvenčního měniče asynchronního motoru od IRC čidla. Od doby kdy byl stejnosměrný pohon kalibrován do současnosti se používáním laboratorního pohonu mohla vyskytnout tato odchylka, činící ca. 10% jmenovité hodnoty.

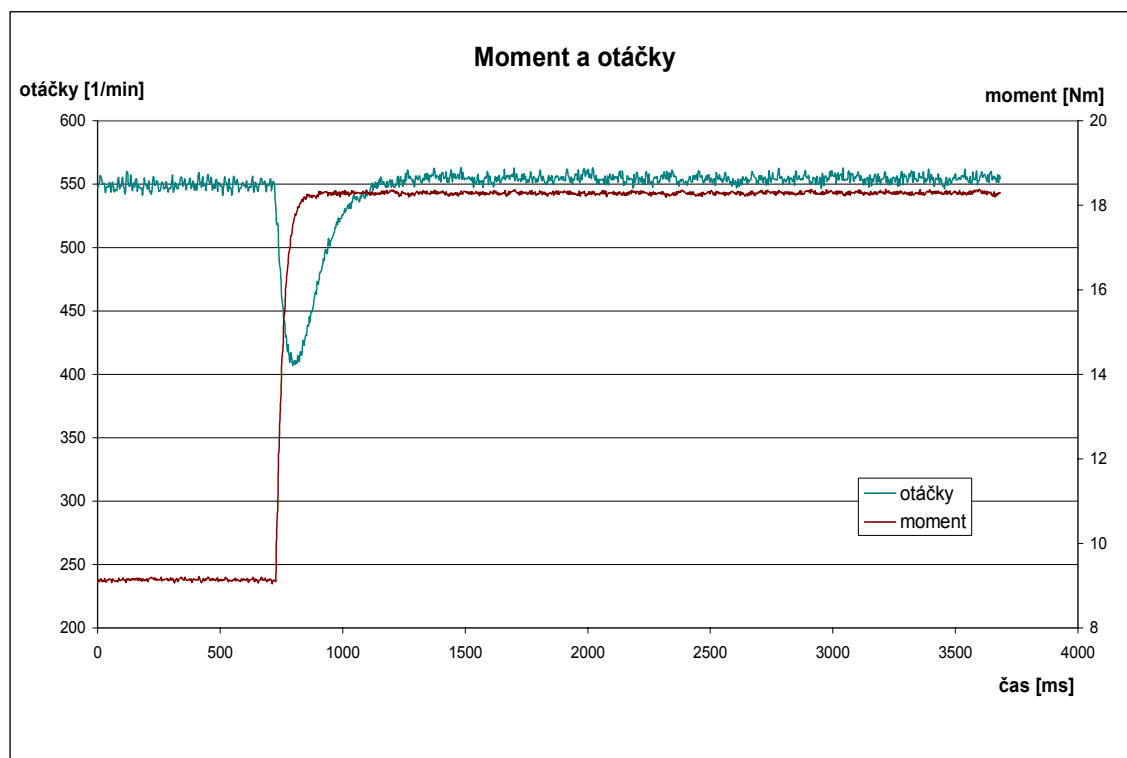
Dále je uveden skok z 50% na 100% jmenovitého momentu při otáčkách 50% jmenovité hodnoty otáček ss. motoru. Charakteristiky jsou podobné s tím rozdílem, že proudy a napětí na výstupu frekvenčního měniče na počátku již nejsou nulové, protože je pohon zatížen již od začátku měření padesáti procenty jmenovitého momentu. Polovičním otáčkám také odpovídá zhruba poloviční hodnota frekvence a napětí z frekvenčního měniče v ustáleném stavu.



Obr. 7-8: Proudy při měření skoku momentu z 0 na 100% při 50% otáčkách



Obr. 7-9: Napětí a frekvence při měření skoku momentu z 0 na 100% při 50% otáčkách



Obr. 7-10: Moment a otáčky při měření skoku momentu z 0 na 100% při 50% otáčkách

7.4 Vliv nastavení parametrů proudového regulátoru na provozní stavy asynchronního stroje

Firma Siemens nedoporučuje měnit parametry proudového regulátoru. Přesto byla tato možnost prozkoumána v následujícím měření. Měněna byla nejprve složka I, pak i složka P proudového regulátoru frekvenčního měniče (viz příloha).

7.4.1 Nastavení motorů pro měření

Nastavení motorů a programu Simovis je totožné jako u předchozího měření.

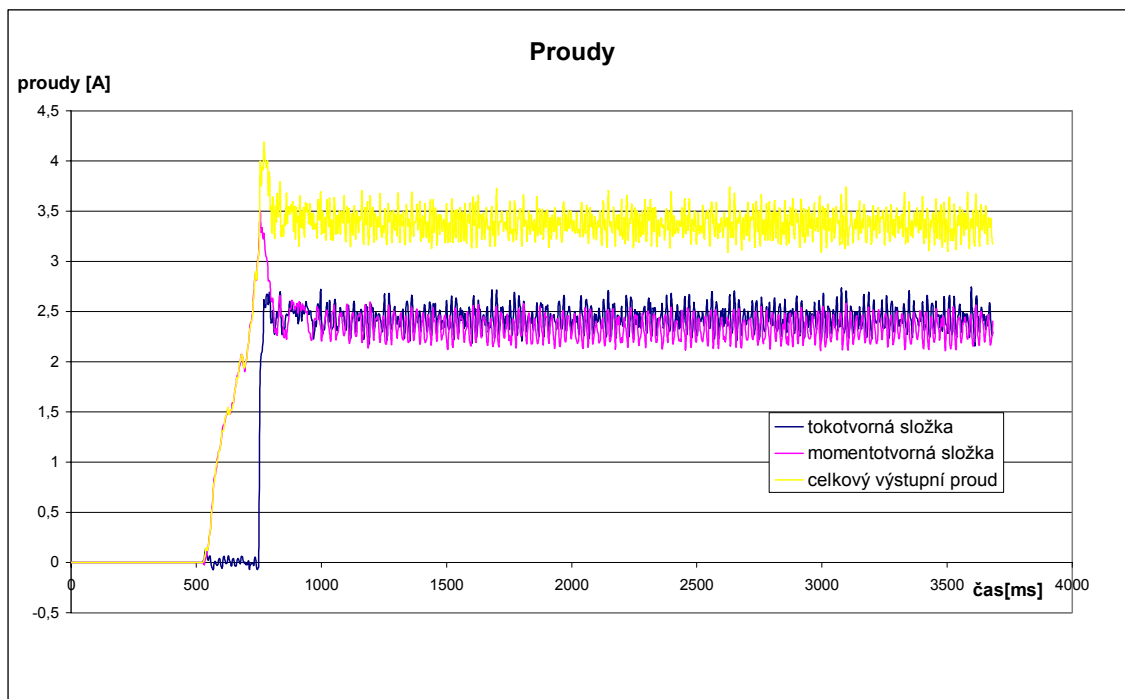
Parametry proudového regulátoru měníme v přímo Simovisu.

- Parametr P283 představuje složku P, která je nastavena na hodnotu 0,231
- Parametr P284 představuje složku I, která je nastavena na hodnotu 6 ms

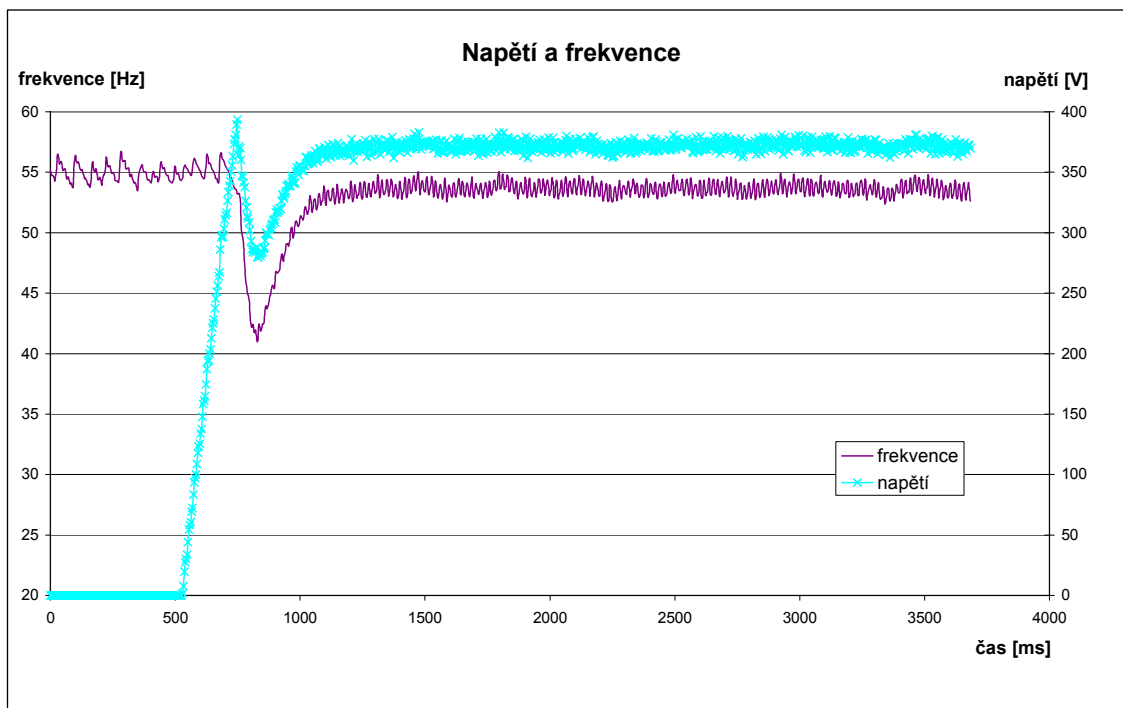
Tyto hodnoty měníme a zjišťujeme vliv na laboratorní pohon.

7.4.2 Naměřené hodnoty

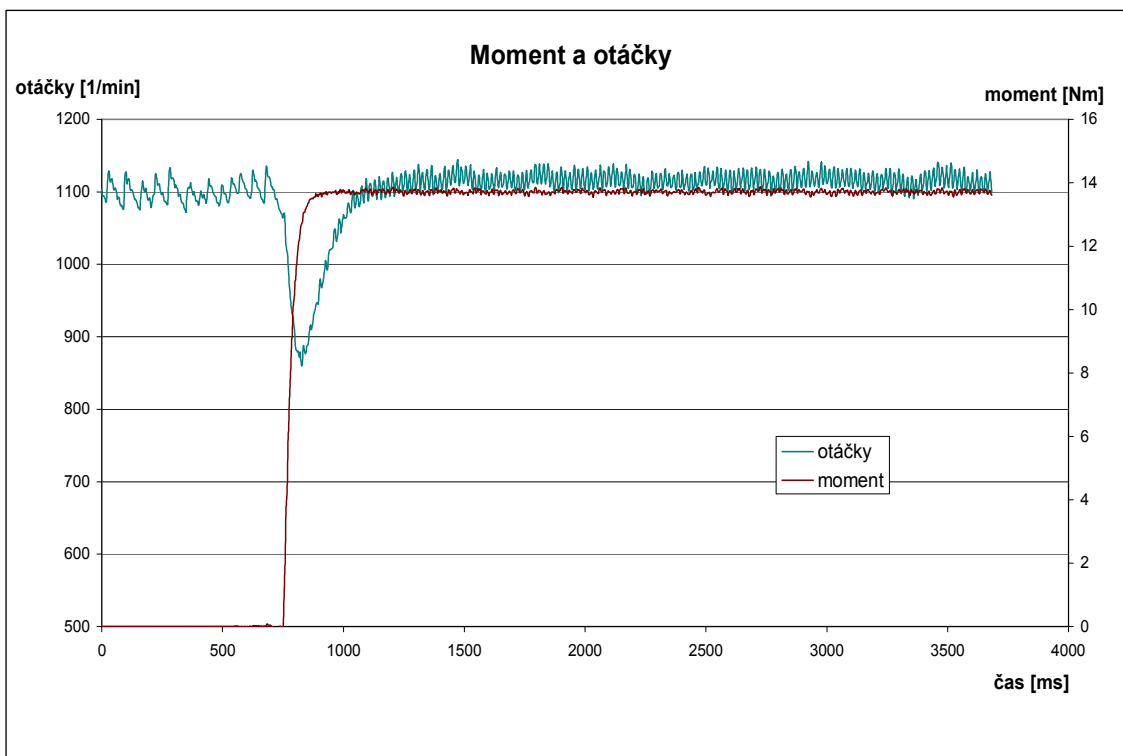
Všechna měření v této kapitole byla provedena při skokovité změně momentu z 0 na 75% (v přepočtu 13,725 Nm). Jako první jsou uvedeny grafy pro tovární nastavení proudového regulátoru měniče: $P = 0,231$ a $I = 6$.



Obr. 7-12: Proudy při továrním nastavení proudového regulátoru

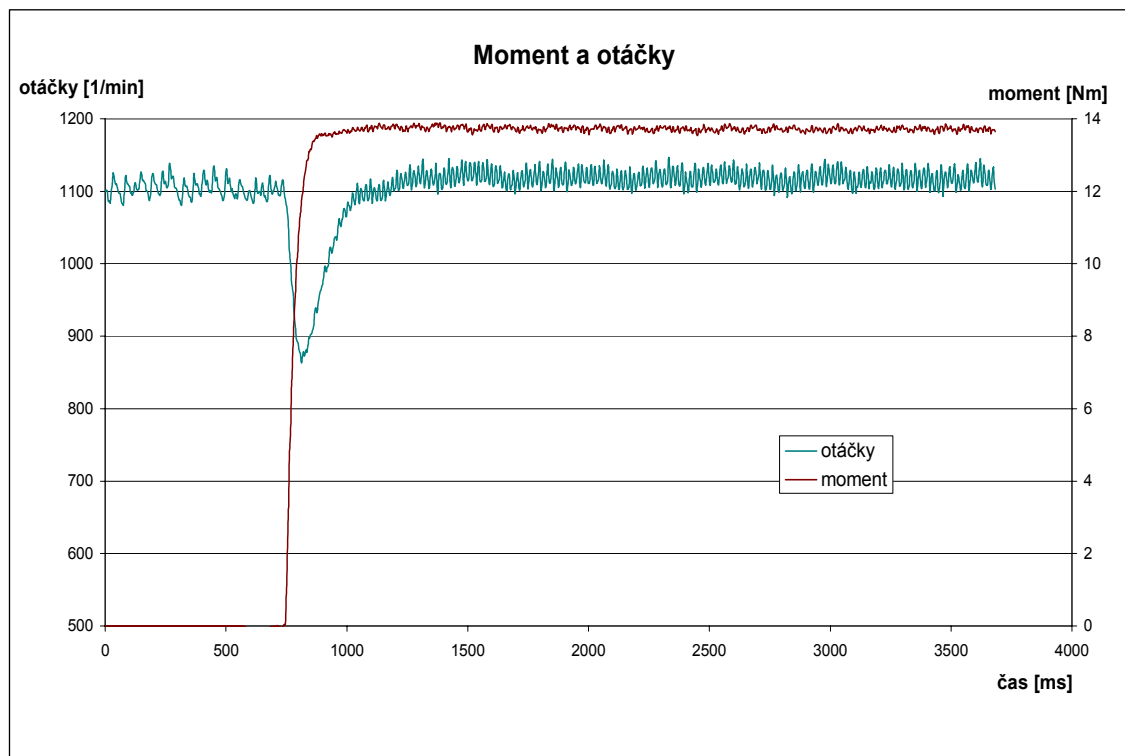


Obr. 7-13: Napětí a frekvence při továrním nastavení proudového regulátoru



Obr. 7-14: Moment a otáčky při továrním nastavení proudového regulátoru

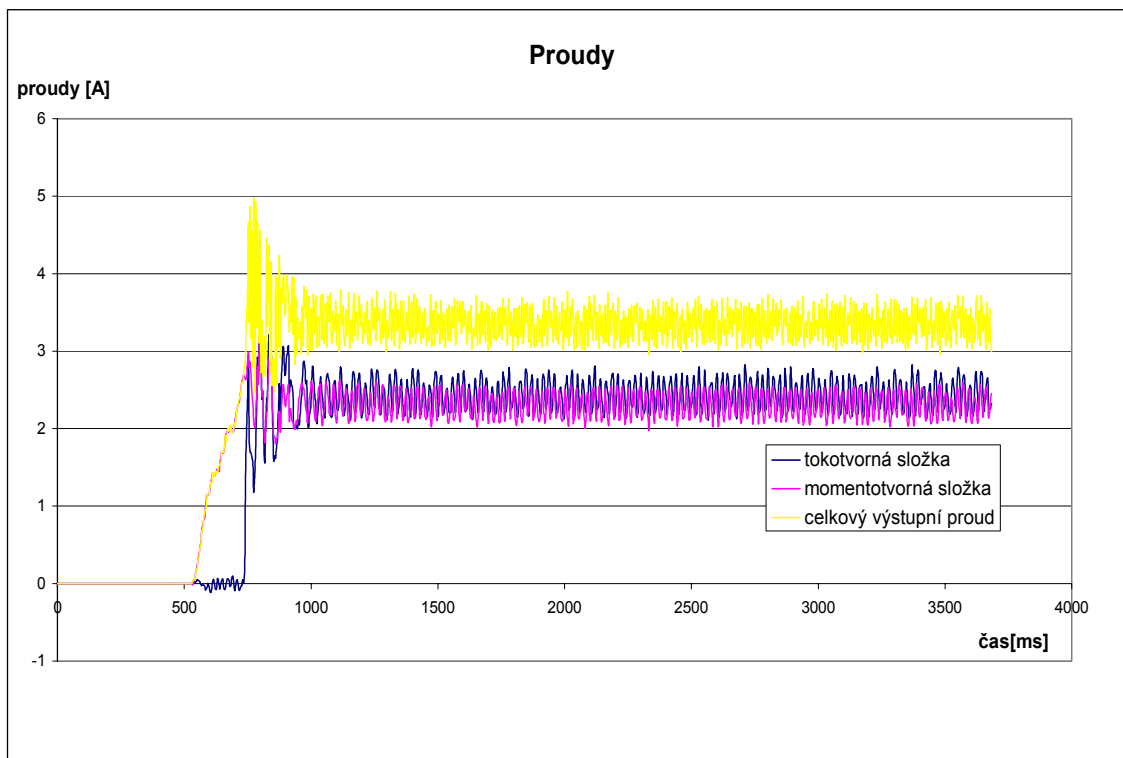
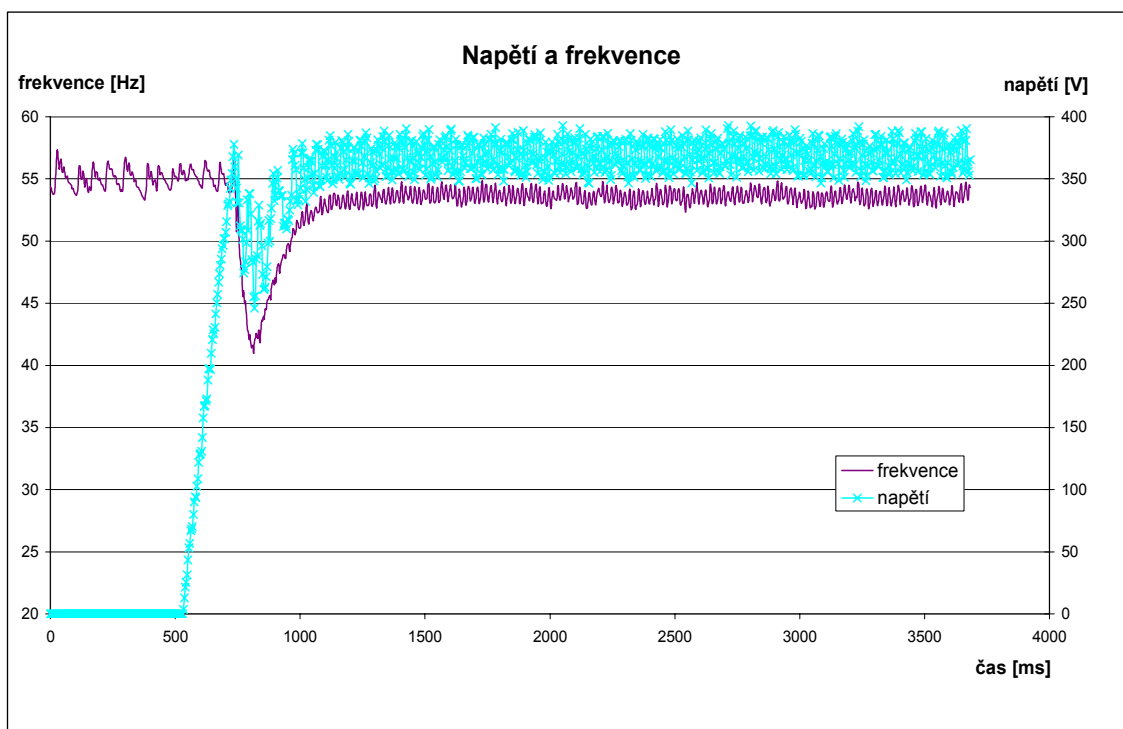
Postupně byla nejprve zvyšována složka I. Zvyšování probíhalo o zhruba 100% předchozí hodnoty (6, 12, 24, 50, 100, 200). Z naměřených hodnot vyplývá, že složka I na stav pohonu nemá velký vliv. Jak je vidět z obr. 7-15, projevuje se složka zvýšení hodnoty složky I pouze před dosažením jmenovité hodnoty momentu, kde moment již netvoří tzv. „koleno“ ale dochází zde k pozvolnějšímu nárůstu na jmenovitou hodnotu.

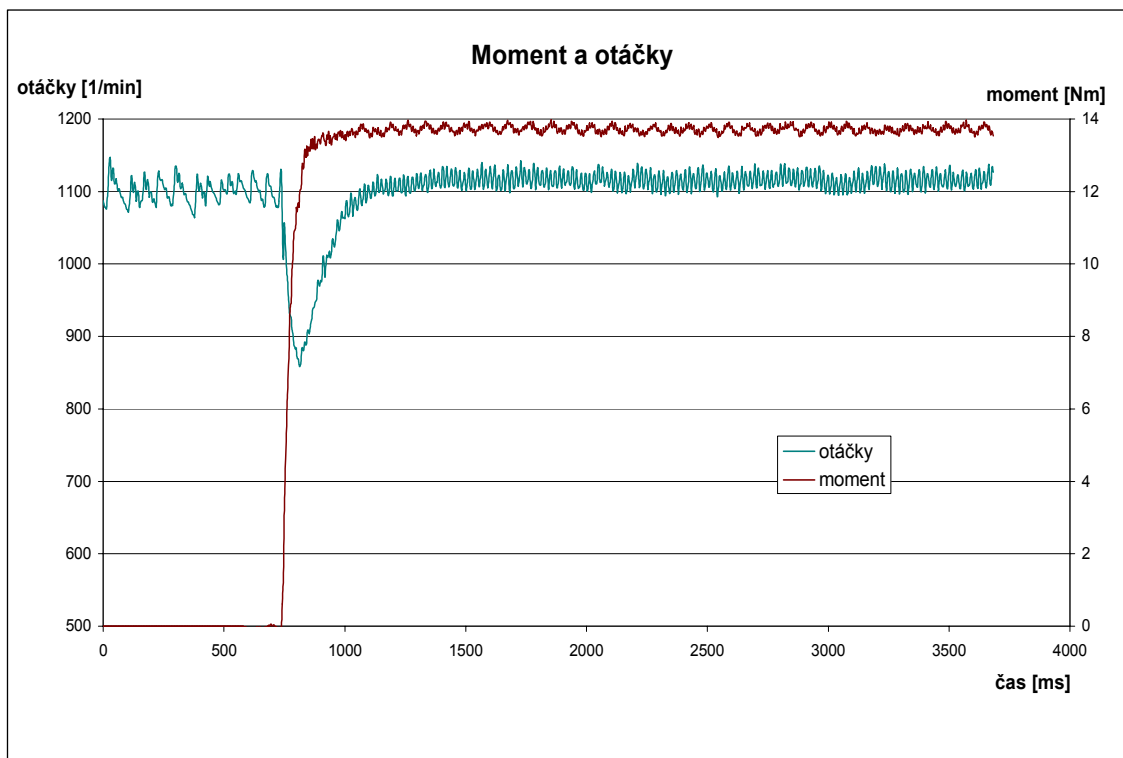


Obr. 7-15: Moment a otáčky při hodnotách proudového regulátoru $P=0,231$ a $I=6$

Ostatní průběhy (otáčky, napětí, frekvence, proudy) se téměř neliší a jsou proto přiloženy jen na kompaktním disku.

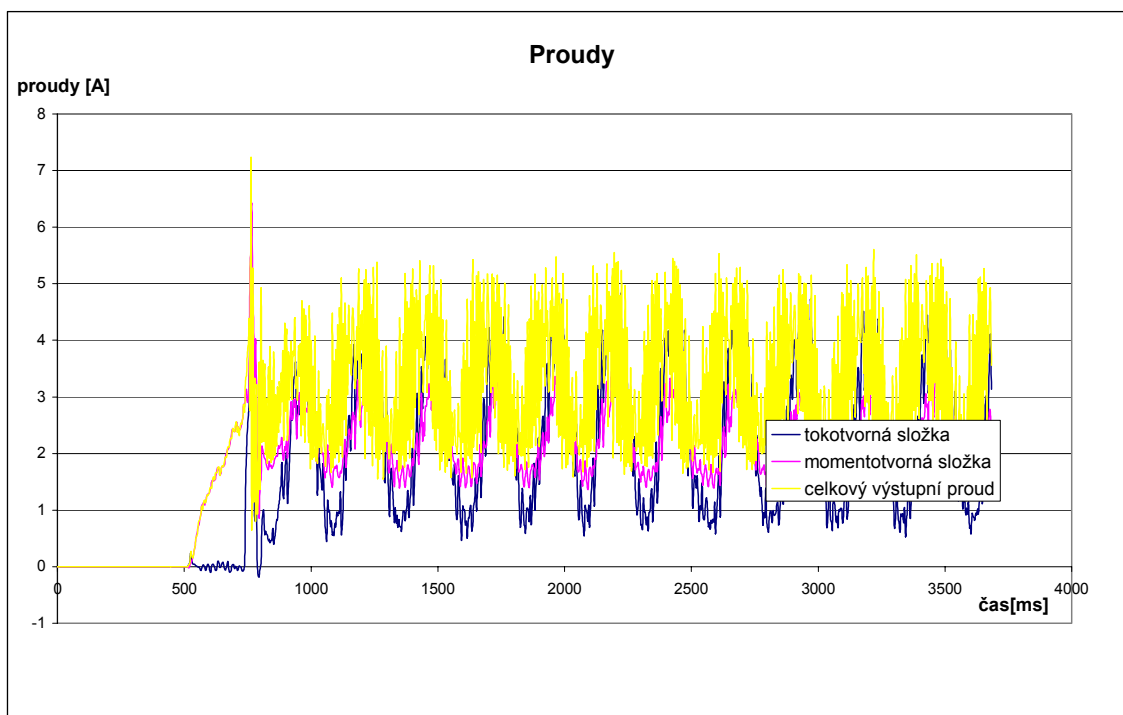
Daleko větší vliv má na provozní stav pohonu má složka P proudového regulátoru. Jejím zvyšováním dosahujeme zrychlení regulačního pochodu. Zvyšování je ale omezeno stabilitou systému. Mez stability byla na základě měření stanovena při $P=600$ resp. $P=700$. Při těchto hodnotách začíná být systém nestabilní, což je vidět z obrázků 7-16 až 7-18. Nestabilita také způsobovala otřesy celého pracoviště, tzv. „cukání pohonu“. Bezpečnost motoru i měřících pracovníků při tomto extrémním zatěžování byla zajištěna důkladným šroubovým spojením pohonu se zemí.

Obr. 7-16: Proudy při hodnotách proudového regulátoru $P=0,700$ a $I=200$ Obr. 7-17: Napětí a frekvence při hodnotách proudového regulátoru $P=0,700$ a $I=200$

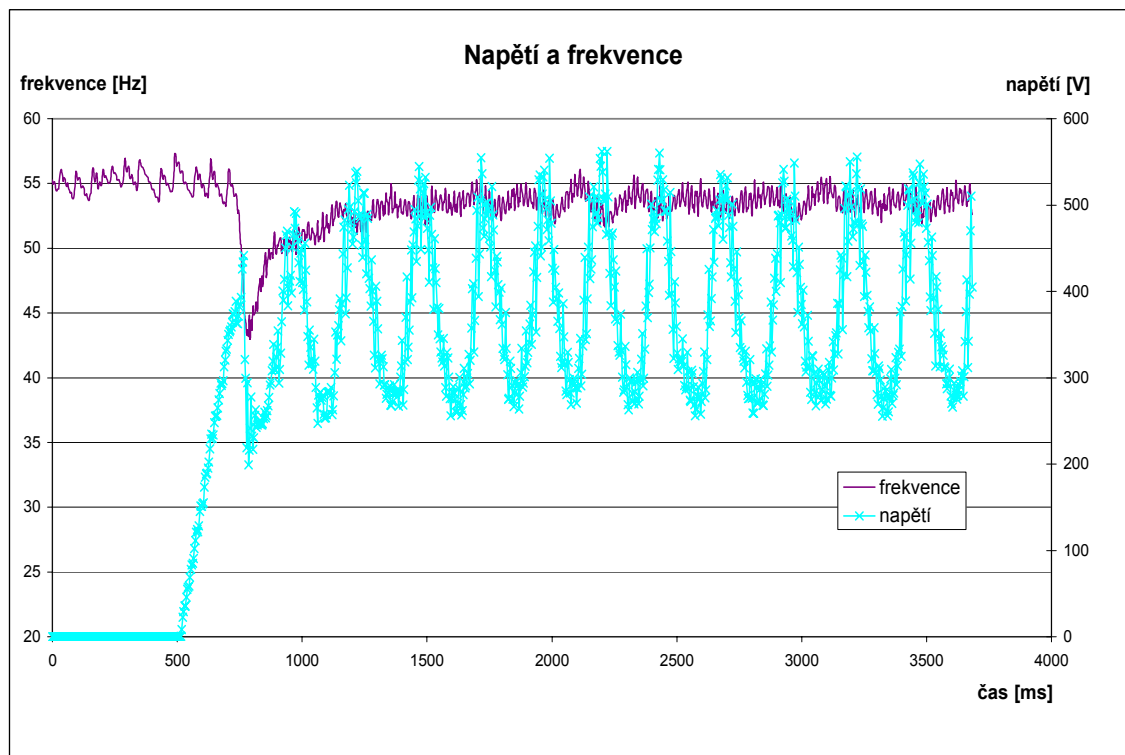
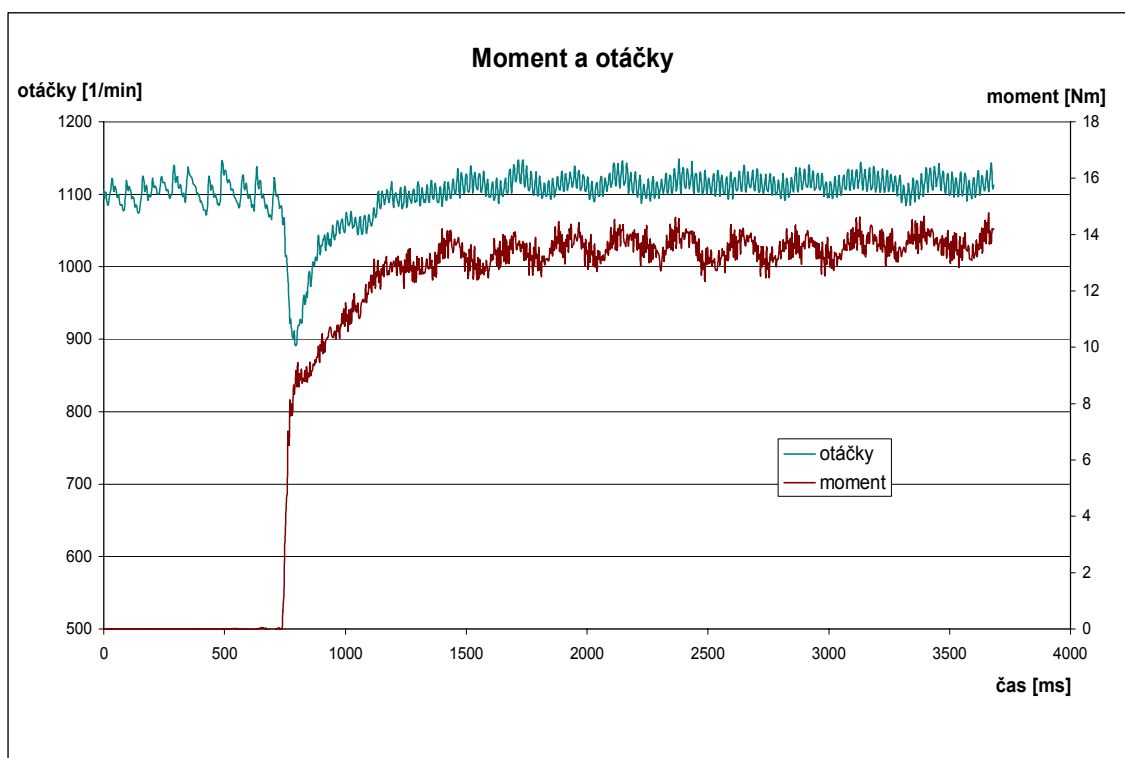


Obr. 7-18: Moment a otáčky při hodnotách proudového regulátoru $P=0,700$ a $I=200$

Na obrázcích 7-19 až 7-21 je pak nejextrémnější nastavení regulátoru, při kterém bylo provedeno měření: $P=0,900$ $I=200$



Obr. 7-19: Proudy při hodnotách proudového regulátoru $P=0,900$ a $I=200$

Obr. 7-20: Napětí a frekvence při hodnotách proudového regulátoru $P=0,900$ a $I=200$ Obr. 7-21: Moment a otáčky při hodnotách proudového regulátoru $P=0,900$ a $I=200$

Napětí přesahuje 500 Voltů a celkový proud 5 Ampér! Takovéto průběhy jsou nežádoucí a dlouhodobé zatěžování motoru s těmito parametry, by vedlo ke zničení motoru.

7.5 Měření vlivu průběhu zátěže na stavy asynchronního motoru

V této kapitole je popsáno a vyhodnoceno měření požadovaných hodnot (momentotvorá a tokotvorná složka statorového proudu, celkový proud, napětí, frekvence, otáčky) v závislosti na velikosti a hlavně tvaru zátěže.

7.5.1 Nastavení motorů pro měření

Parametry pohonů zůstávají stejné jako v předchozích kapitolách mění se pouze způsob zadávání momentu. Různé průběhy momentu jsou nasimulovány v programu Matlab Simulink a přes měřicí kartu Humusoft MF 604 přivedeny přes analogové vstupy – konkrétně AI1+ a AI1- - do měniče. Změnu zdroje momentu musíme nastavit parametrem P486, konkrétně změnou jeho zdrojového signálu na AI1.

V programu Matlab Simulink byly nasimulovány tři různé typy signálů:

- A. Sinusový signál
- B. Trojúhelníkový signál
- C. Obdélníkový signál

Při vlastním měření se tento signál použít do měniče jako moment a sleduje se schopnost měniče tento signál dodržet. A to při různých periodách průběhů.

Pro generování sinusového a obdélníkového signálu byly použity zdroje jednotlivých signálů, které jsou k dispozici jako základní prvky knihovny Simulinku, trojúhelníkový signál byl pak manuálně vytvořen pomocí bloku „signal builder“.

V programu Simovis trace, byla přidána další sledovaná veličina a to požadovaný moment. Tím je v grafech zřetelně vidět rozdíl mezi žádanou hodnotou a hodnotou, kterou měnič při dané periodě signálu dokázal uregulovat.

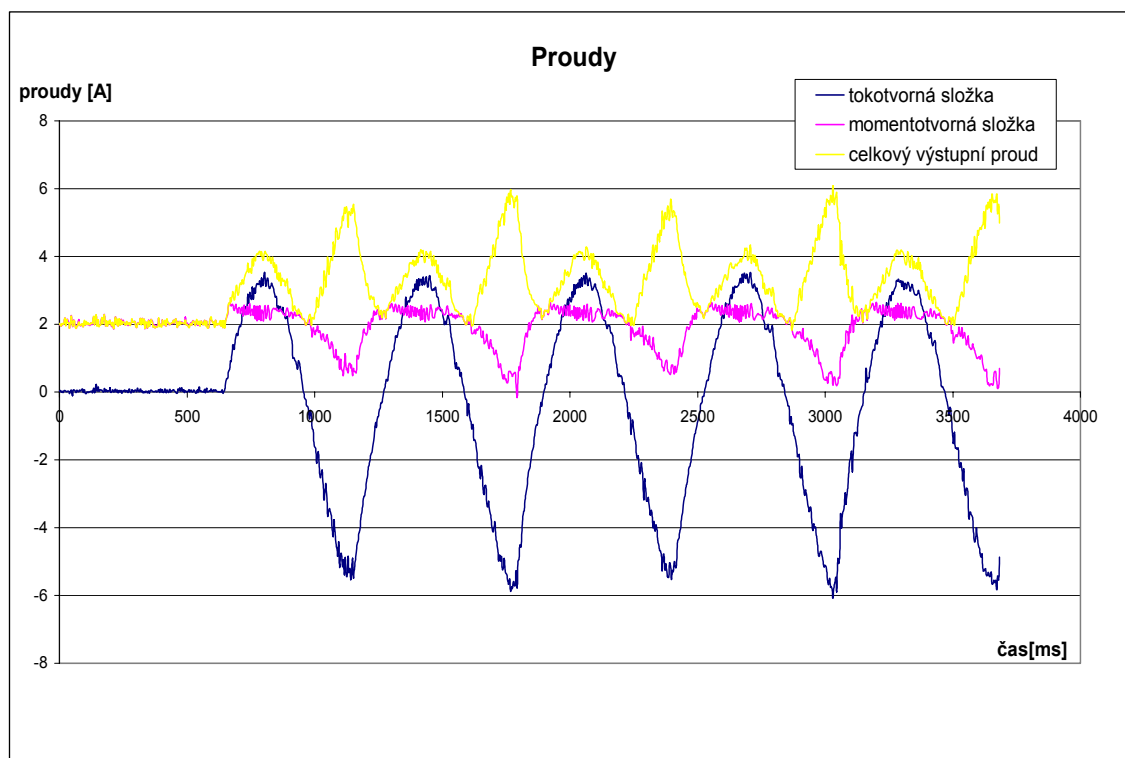
7.5.2 Naměřené hodnoty

V této kapitole jsou postupně zobrazeny a vyhodnoceny reakce měniče a asynchronního motoru na tři různá (sinus, obdélník a trojúhelník) momentová zatížení.

7.5.2.1 Sinusový průběh momentu

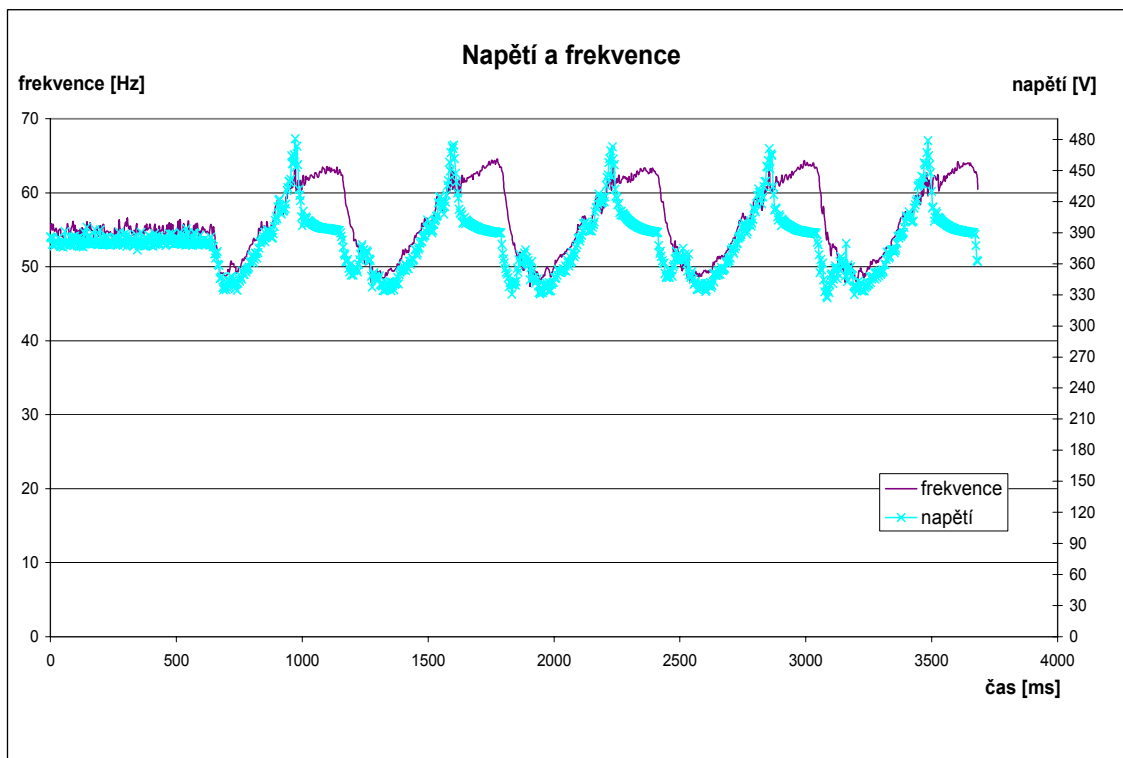
Sinusový průběh je ze tří uvedených průběhů ten nejméně náročný, jelikož je spojitý a neobsahuje náhlé (skokové) dané veličiny (v tomto případě momentu) v čase. Lze proto předpokládat, že měnič bude schopen „uregulovat“ lépe sinusový signál nežli např. signál obdélníkový se stejnou periodou.

Na obrázcích 7-22 až 7-24 jsou vidět požadované veličiny při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě zhruba 0,63 sekundy. Při této hodnotě je měnič schopen udržet požadovaný momentový průběh. S klesající periodou se však signál zpožďuje. To je vidět z obrázku 7-25, na kterém je zobrazen průběh momentu o periodě 0,5 sekundy.

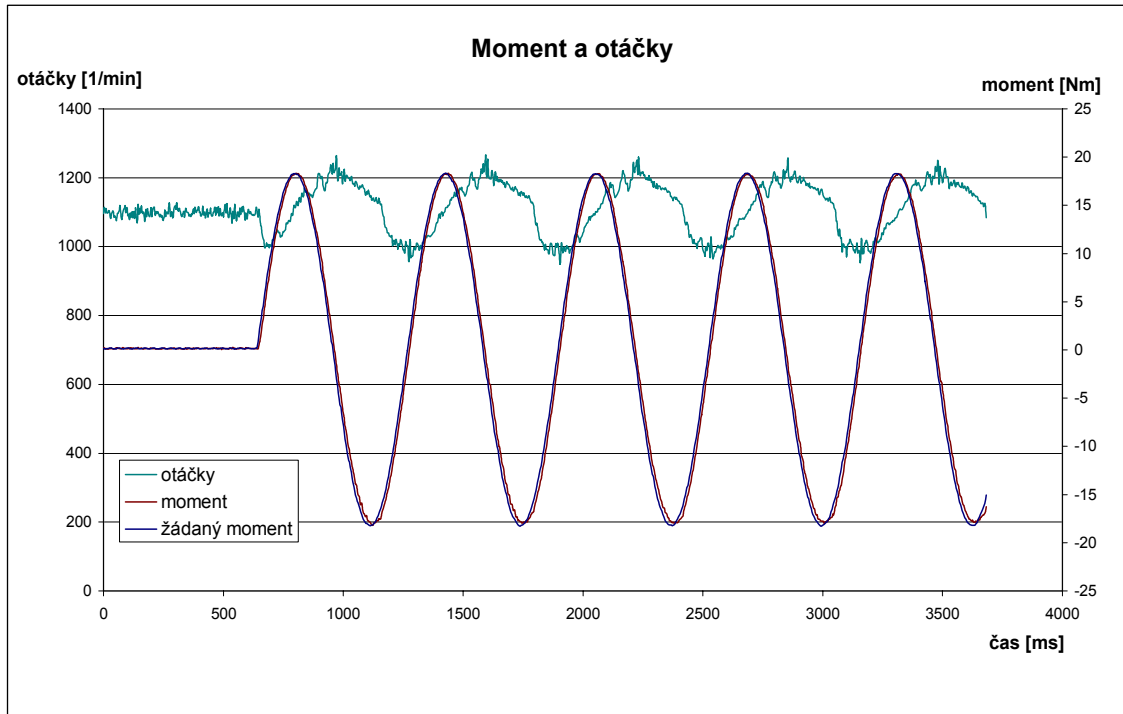


Obr. 7-22: Proudy při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,63s

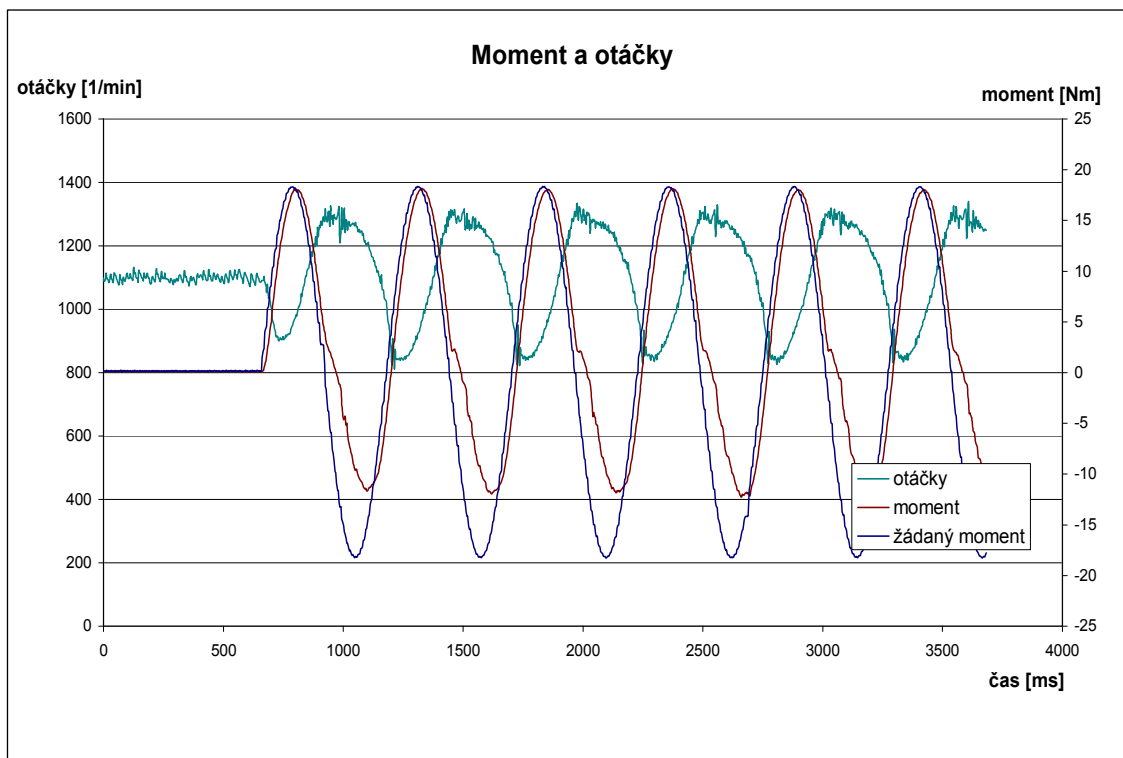
Tvar průběhu momentu se nejvíce odráží na tokotvorné složce proudu a na jejím průběhu nejvíce při poklesu z maximální hodnoty. Je to dáno tím, že v je v tomto okamžiku požadována největší změna momentu v čase (od 100% hodnoty momentu na -100%). Absolutní hodnota tokotvorné složky je tedy největší a motorem protéká největší magnetický tok.



Obr. 7-23: Napětí a frekvence při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,63s

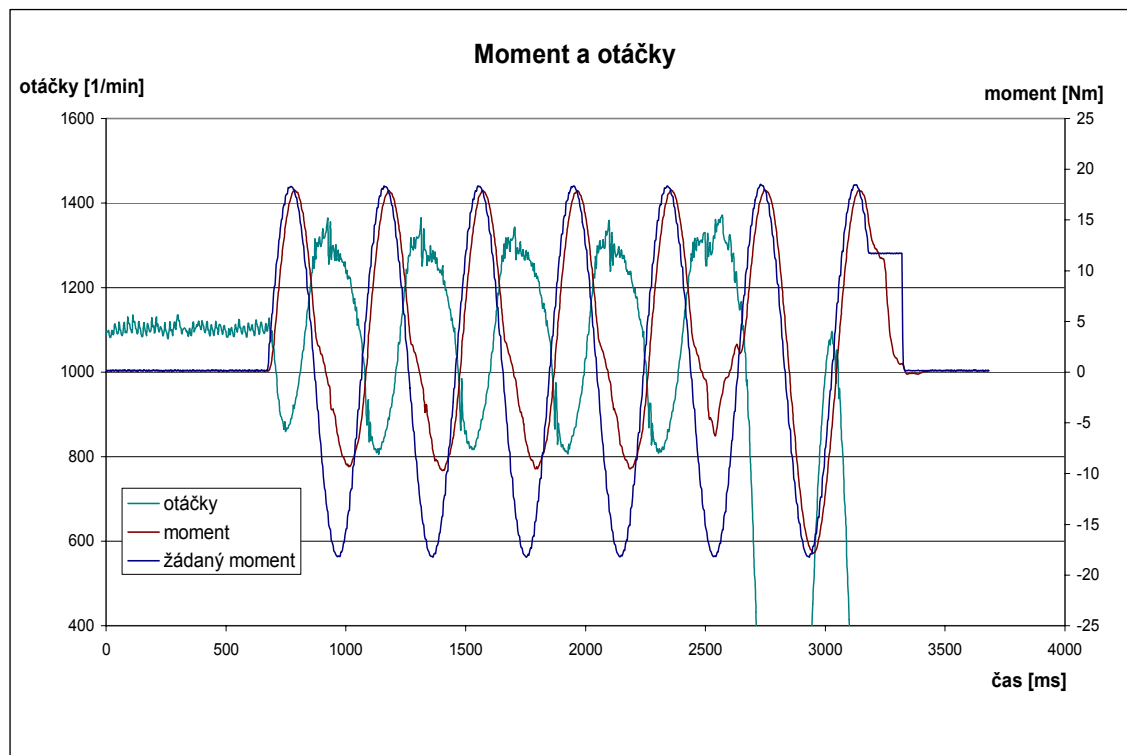


Obr. 7-24: Momenty a otáčky při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,63s



Obr. 7-25: Momenty a otáčky při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,5s

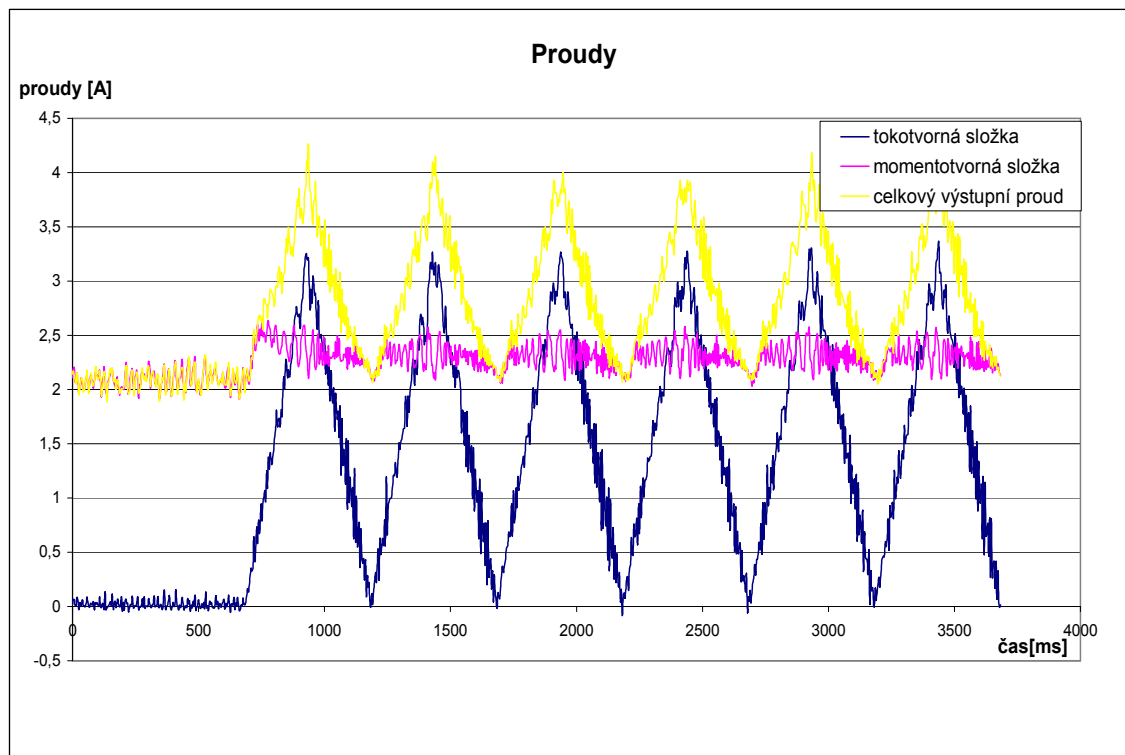
Na tomto grafu je vidět, že měnič hlavně při největší změně požadovaného momentu (ze +100% na -100%) při této periodě signálu už nestíhá soustavu uregulovat. Pro menší periody (obr. 7-26) je měření již problémové. Celý systém padá z důvodu otáčkového přetížení



Obr. 7-26: Momenty a otáčky při zatěžování sinusovým průběhem momentu o periodě 0,4s

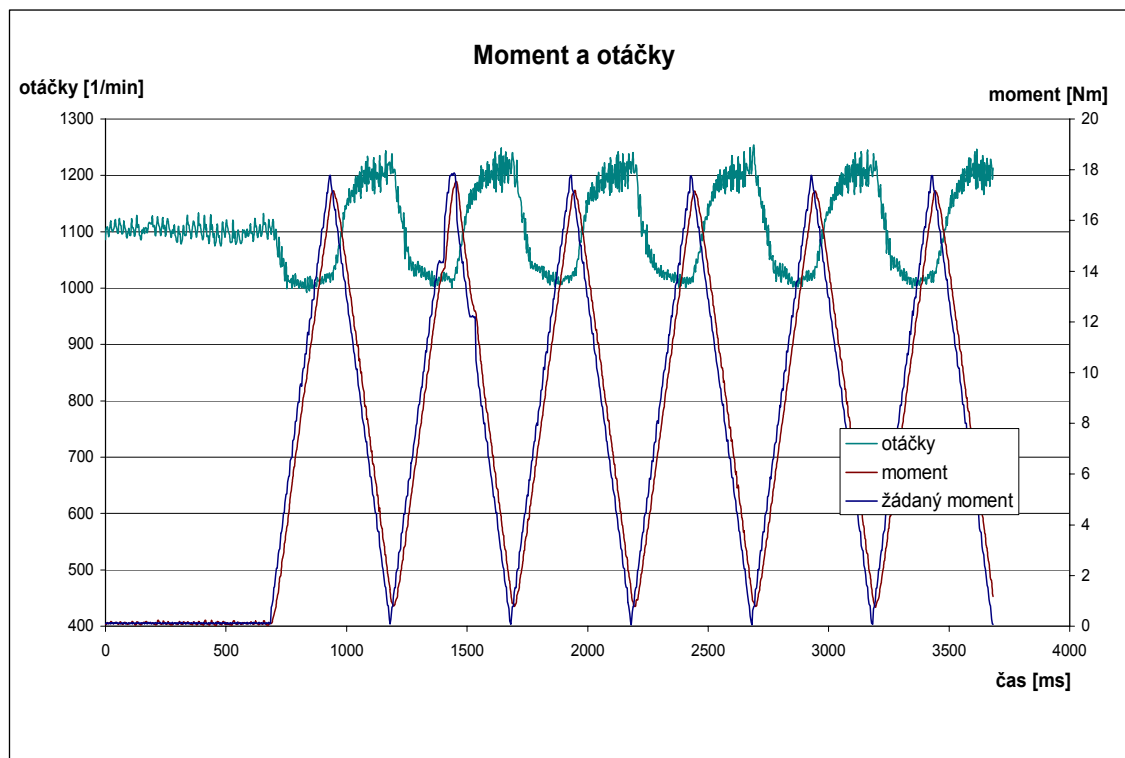
7.5.2.2 Trojúhelníkový průběh momentu

Při takovémto průběhu je u signálu s totožnou periodou změna momentu v čase větší nežli tomu bylo u sinusového průběhu. U měření se sinusovým signálem navíc obsahovala jedna perioda dvě půlvlny opačné orientace, u trojúhelníkového signálu tvoří periodu pouze jeden trojúhelník kladné orientace. Proto je mezní perioda (perioda, při které je měnič schopen uregulovat pohon na požadovaný moment) větší než u předchozích měření.



Obr. 7-27: Proudy při zatěžování trojúhelníkovým průběhem momentu o periodě 0,5s

Z grafu na obrázku 7-27 opět vidíme, že zejména tokotvorná složka statorového proudu je závislá **přímo** na tvaru a velikosti zátěže. Momentotvorná složka statorového proudu se s vzrůstající amplitudou momentu více rozkmitává. Na tvaru celkového výstupního proudu se promítne více složka tokotvorná.

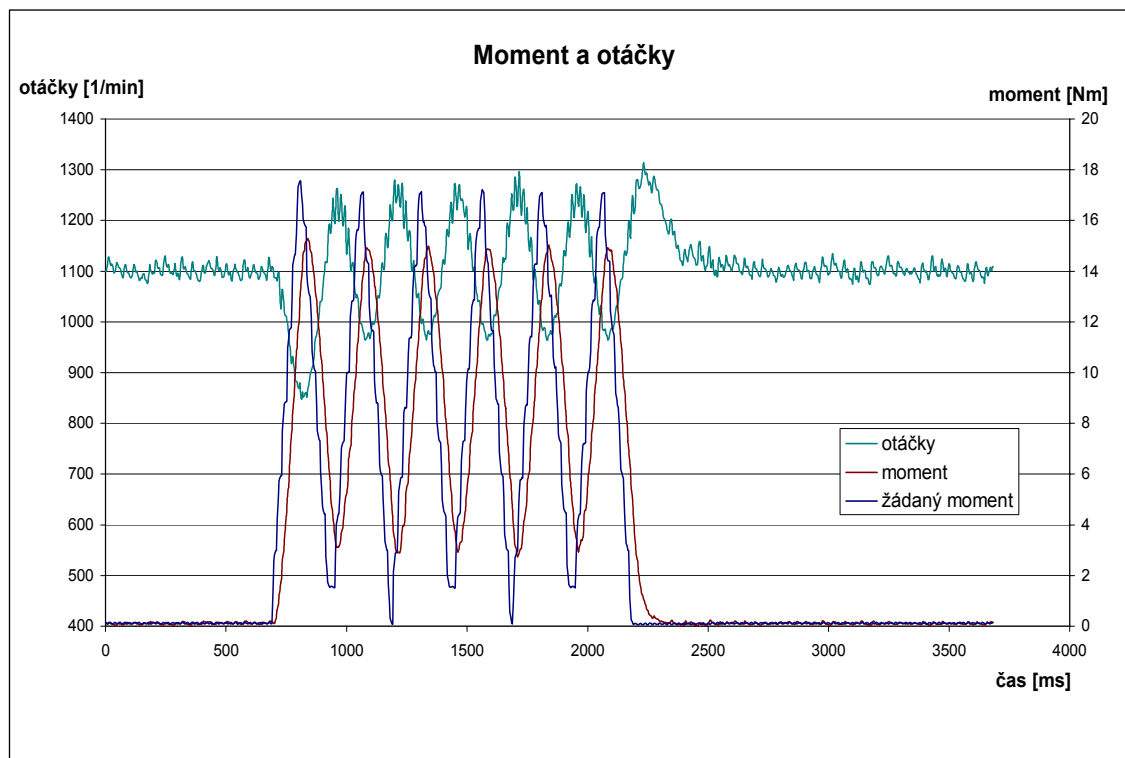


Obr. 7-28: Momenty a otáčky při zatěžování trojúhelníkovým průběhem momentu o per. 0,5s

Z grafů momentů na obrázku 7-28 je zřejmé, že již při této frekvenci moment zaostává za požadovanou hodnotou a díky tomu se ani nedostane na nulovou hodnotu v dalších periodách.

Na obrázku 7-29 je zobrazeno měření s periodou signálu 0,25s. Z tohoto měření je patrné, že měnič nedokázal rozpoznat signál s tak malou periodou, jelikož vykreslený průběh požadovaného momentu se neshoduje úplně s tvarem nasimulovaným v programu Matlab Simulink. Je vidět, že hrany signálu jsou ožíznuté. Reakce momentu na tento průběh je pak ještě více zpomalená. Fázový rozdíl na konci první periody činí ca. 60ms.

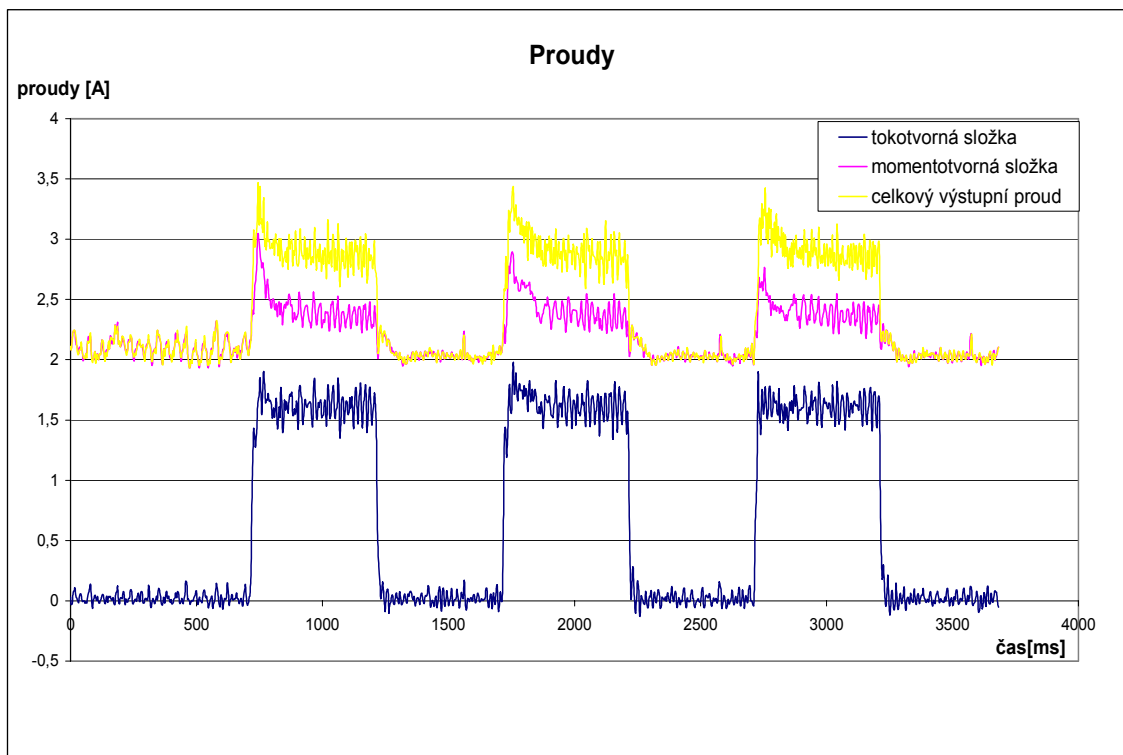
Avšak jelikož je maximální změna momentu poloviční než tomu bylo u sinusového signálu (kde byl rozdíl momentů špička-špička oproti trojúhelníku dvojnásobný), nedochází ke kolapsu systému z důvodu otáčkového omezení. Otáčky se pohybují v rozumných hodnotách mezi 1000 a 1200 otáčkami/minutu.



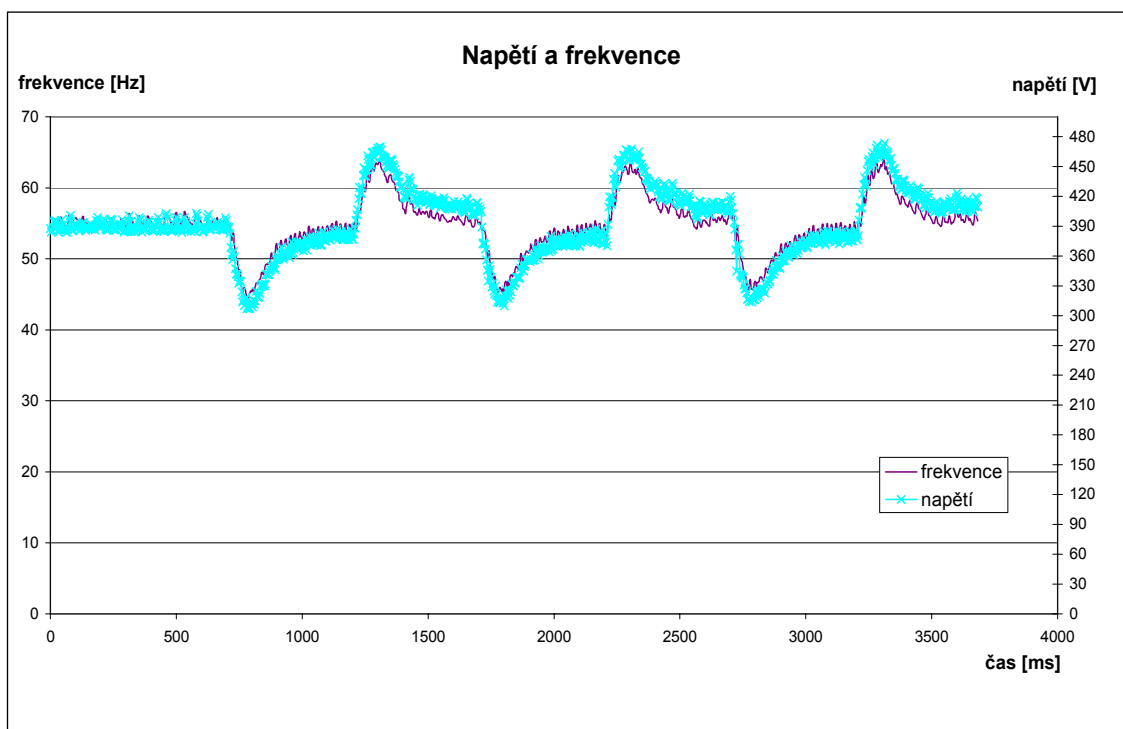
Obr. 7-29: Momenty a otáčky při zatěžování trojúhelníkovým průběhem momentu o periodě 0,25s

7.5.2.3 Obdélníkový průběh momentu

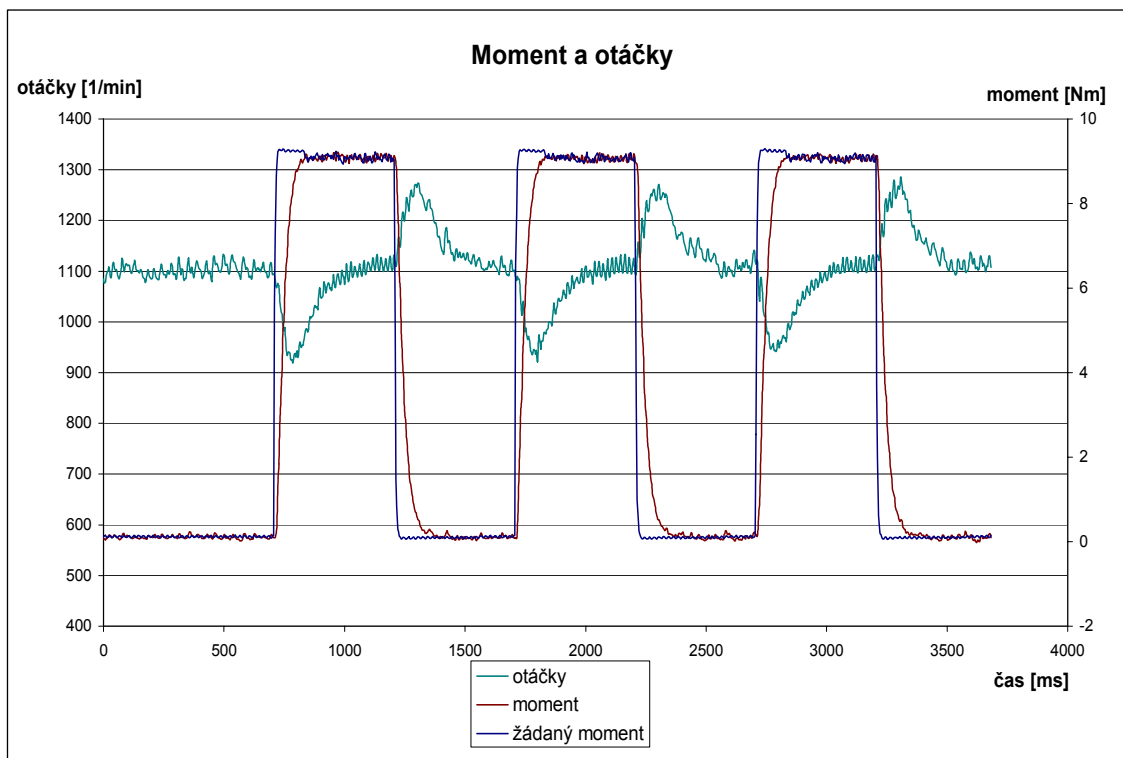
Tento průběh momentu je pro měnič nejobtížnější pro regulaci. Dochází totiž na minimálním časovém intervalu k velkému skoku momentu. Není tedy jako u předchozích dvou průběhů předmětem zkoumání minimální frekvence signálu, který je měnič schopen uregulovat, ale spíše skutečnost, jak velký okamžitý skok momentu měnič snese. Na obrázcích 7-30 až 7-32 jsou vidět průběhy požadovaných veličin při zatěžování obdélníkovým průběhem o periodě 1 s avšak již ne s amplitudou 18,3 Nm, ale poloviční. Z grafů proudů je vidět, že průběh momentu při skokovém zatěžování má vliv jak na tvar tokotvorné, tak i momentotvorné složky statorového proudu. V celkovém statorovém proudu se pak opět více uplatňuje tokotvorná složka.



Obr. 7-30: Proudy při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 1s

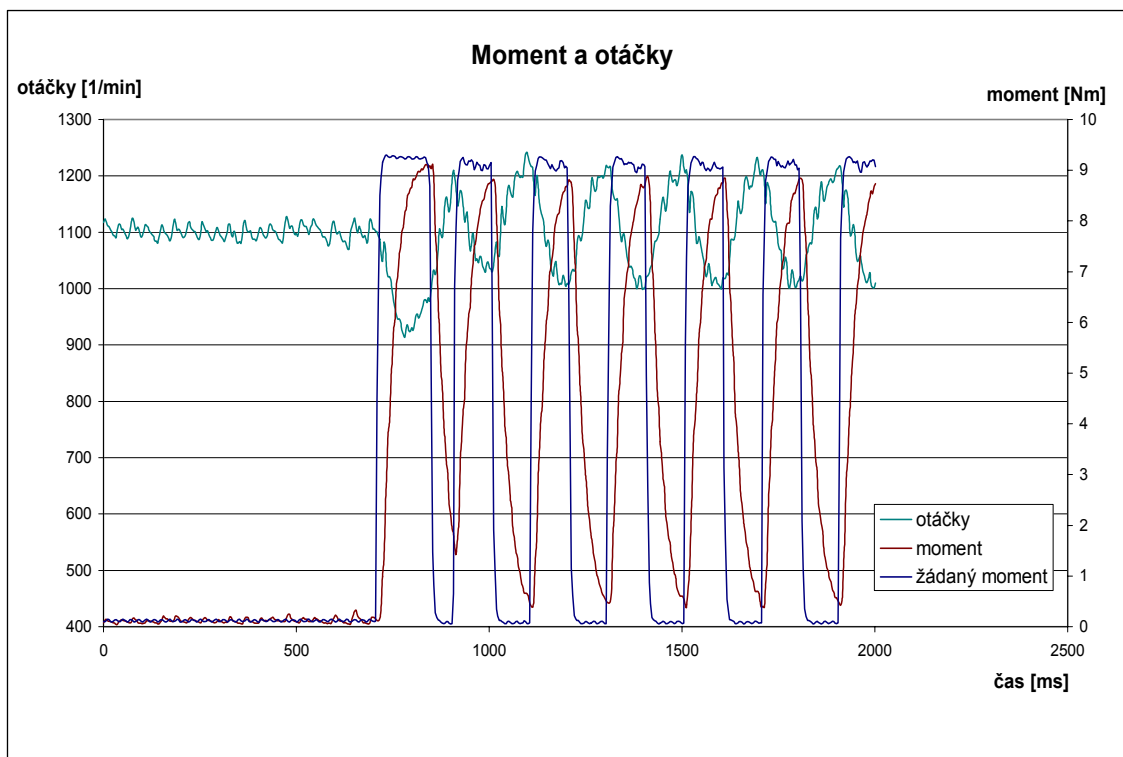


Obr. 7-31: Napětí a frekvence při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 1s



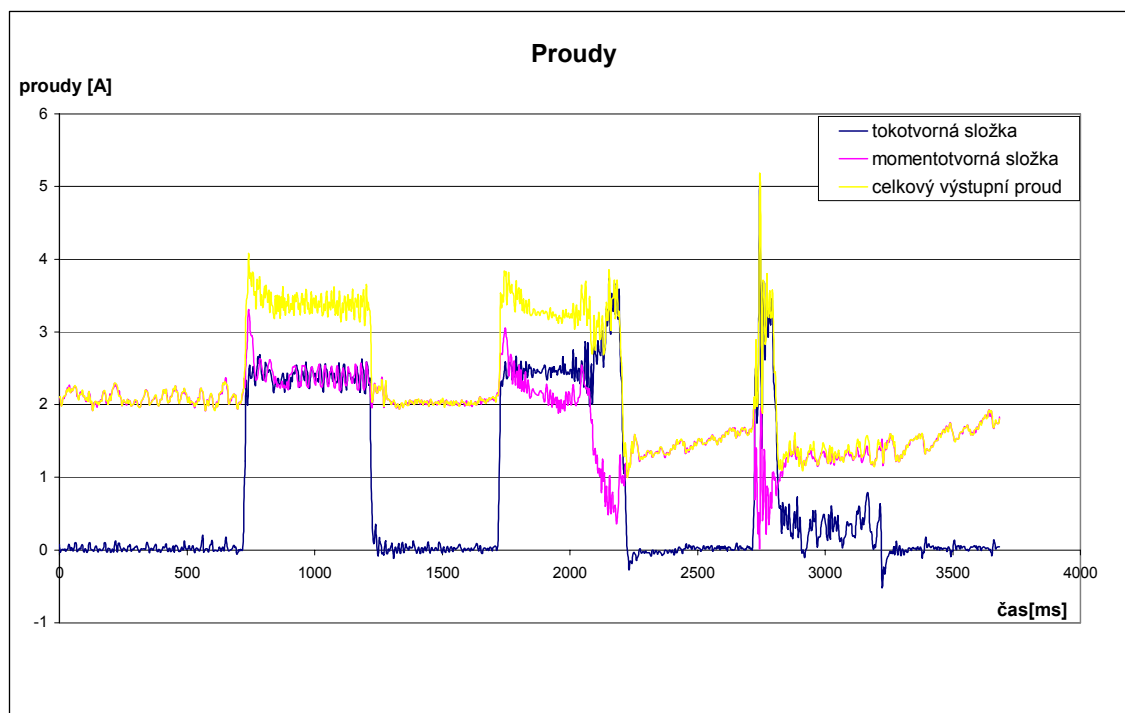
Obr. 7-32: Momenty a otáčky při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 1s

Z obrázku 7-32 lze odhadnout, že při periodě pětikrát menší, již měnič nebude schopen regulovat na požadovaný moment. Obrázek 7-33 tuto hypotézu potvrzuje.

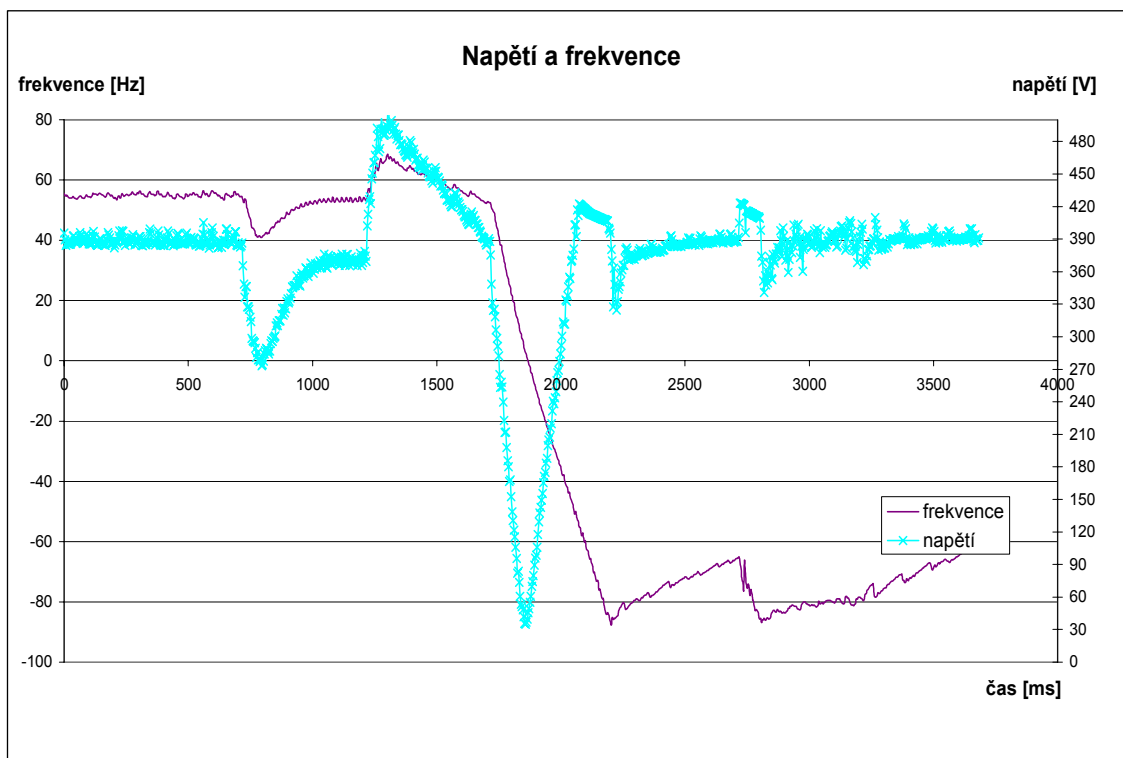


Obr. 7-33: Momenty a otáčky při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o periodě 0,2s

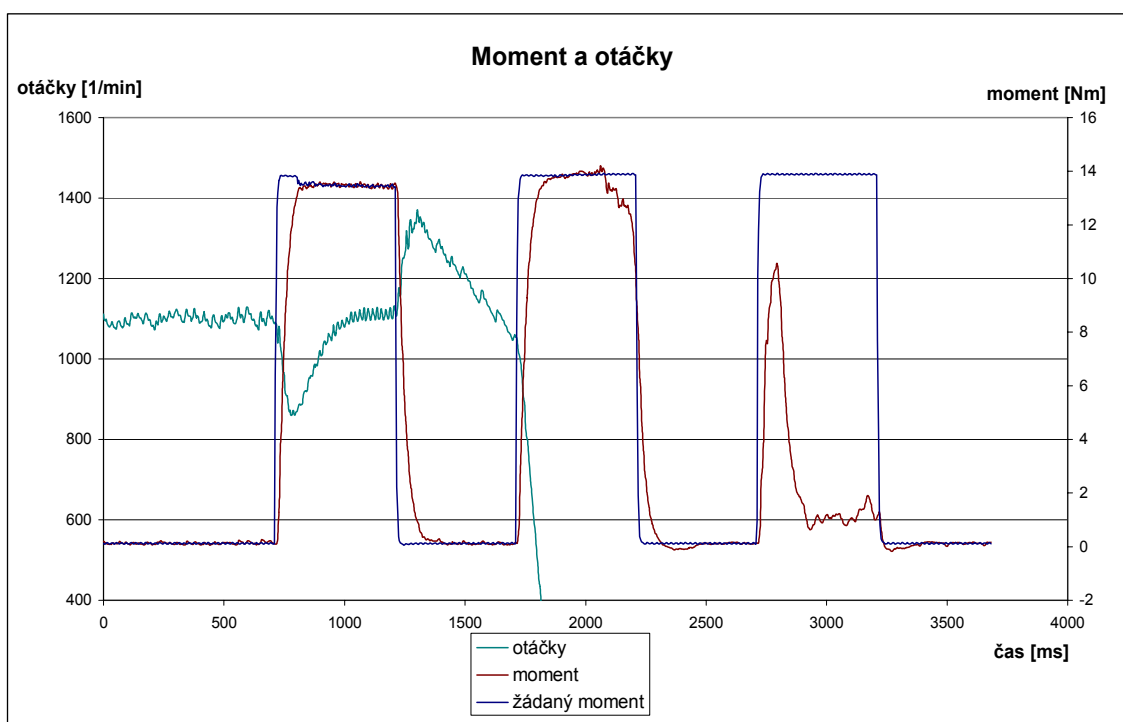
Další postup měření spočíval v navyšování hodnoty momentu. Skokový nárůst momentu na 60% jmenovitého momentu byl měnič ještě schopný realizovat, s hodnotou 75% ale již opět zasáhlo otáčkové omezení a pohon systém zkolaboval po nástupu druhé periody (viz obrázky 7-34 až 7-36).



Obr. 7-34: Proudy při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu s amplitudou 13,725 Nm



Obr.7-35: Napětí a frekvence při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o amplitudě 13,725Nm



Obr.7-36: Momenty a otáčky při zatěžování obdélníkovým průběhem momentu o amplitudě 13,725Nm

7.6 Zhodnocení dosažených výsledků

Realizaci měření předcházelo nastavení parametrů pohonu a podmínek měření, týkajících se vektorové regulace asynchronního motoru frekvenčním měničem Simovert masterdrives a tvorba zátěžných momentových charakteristik v prostředí Matlab Simulink za využití měřicí karty Humusoft MF 604. Problém nastával kvůli vysoké hardwarové náročnosti karty. Spočíval v častém restartování se počítače uprostřed komunikace přes kartu. S tímto problémem se již zabývaly minulé práce v laboratoři bez výrazného efektu a zlepšení.

Vlastní měření lze rozdělit do dvou přínosných skupin.

První z nich je zjišťování vlivu nastavení parametrů proudového regulátoru frekvenčního měniče na provozní stavy asynchronního motoru. Zde se dospělo k závěru, že hlavní složka ovlivňující negativně stabilitu je složka P. Mezní hodnota této složky byla experimentálně stanovena na hodnotu 0,700. při dalším zvyšování této složky se pohon stává nestabilním a při trvalém chodu za těchto podmínek by mohlo dojít k jeho poškození.

Bylo dosaženo závěru, že tovární nastavení hodnot složek $P=0,231$ a $I=2$. Je opravdu nejideálnější z hlediska ergonomie chodu pohonu.

Druhé měření spočívalo ve zjištění schopnosti frekvenčního měniče Simovert Masterdrives takzvaně „uregulovat“ pohon na požadovaný průběh momentu. V prostředí Matlab Simulink byly vygenerovány sinusové, trojúhelníkové a obdélníkové signály o různých frekvencích a zjišťovalo se, zda je pohon schopen za pomoci frekvenčního měniče tyto průběhy splnit.

Dosáhlo se závěru, že sinusový průběh momentu je bezproblémově přenášen na motor do hodnot jeho periody ca. 0,6s. Při nižších periodách signálu docházelo ke zpožděním a zejména záporná půlvlna nebyla dodržena v celém rozsahu amplitudy.

Trojúhelníkový signál vykazoval zpoždění již od periody 0,5s, přičemž musíme mít na mysli, že periodu tvořil pouze jeden kladný trojúhelník. Takže, chtěli-li bychom ho porovnat se sinusovým průběhem, museli bychom periodu vydělit dvěma. Od této periody (0,25s) už ale nebyl měnič schopen správně přijmout požadovaný signál – ořezával špičky.

Pro pohon a měnič nejnáročnější měření bylo při zatěžování pohonu obdélníkovým průběhem momentu. Zde musel být moment snížen z jmenovité hodnoty na polovinu (9,15Nm). Při pokusu o regulaci skoku na 75% jmenovitého momentu totiž zasáhlo

otáčkové omezení a pohon zkolaboval – regulační jednotka stejnosměrného (hnacího) motoru zahlásila chybu a odpojila motor. Na hodnotu 50% jmenovitého momentu se při skokovém požadavku dostal moment za zhruba 0,2 s, což je také hranice periody signálu, na který byl měnič schopen reagovat.

8 Závěr

Diplomová práce popisuje možnost řízení asynchronního motoru prostřednictvím měniče firmy Siemens. Zaměřuje se na vektorovou regulaci na konstantní moment nebo na požadovaný průběh momentu.

K tomu využívá spojení frekvenčního měniče s počítačem, který zajišťuje komfortní parametrizaci frekvenčního měniče Simovert Masterdrives napájecího asynchronní (hnaný) motor a řídicí jednotky Simoreg napájecí hnací stejnosměrný motor s cizím buzením.

Dále je počítač spolu se softwarem Matlab Simulink určen pro generování různých průběhů momentu, které se přes analogové vstupy přivádí do frekvenčního měniče. Ten má pak za úkol regulovat pohon podle těchto průběhů.

Měření byla rozdělena na dvě části, přičemž první se zabývá vlivem nastavení parametrů proudového regulátoru frekvenčního měniče na stavy asynchronního motoru. Zde byl po proměření různých nastavení parametrů potvrzen předpoklad, že pro optimální a ergonomický provoz je nejvýhodnější tovární nastavení, které výrobce měniče (firma Siemens) nedoporučuje měnit.

Ve druhé části měření byla využita karta Humusoft MF 604 ve spolupráci s analogovými vstupy měniče pro generaci různých signálů měniče a byly stanoveny meze signálů z hlediska amplitudy a periody pro využití měničem Simovert Masterdrives a laboratorním pohonem.

Výsledky měření lze využít pro modelování a ověřování vlastností pohonů s asynchronními motory při vektorové regulaci na požadovaný moment.

V reálných aplikacích jsou to veškeré navíjecí aplikace jako např. navíječky drátů, pásů, tiskařské stroje, atd.

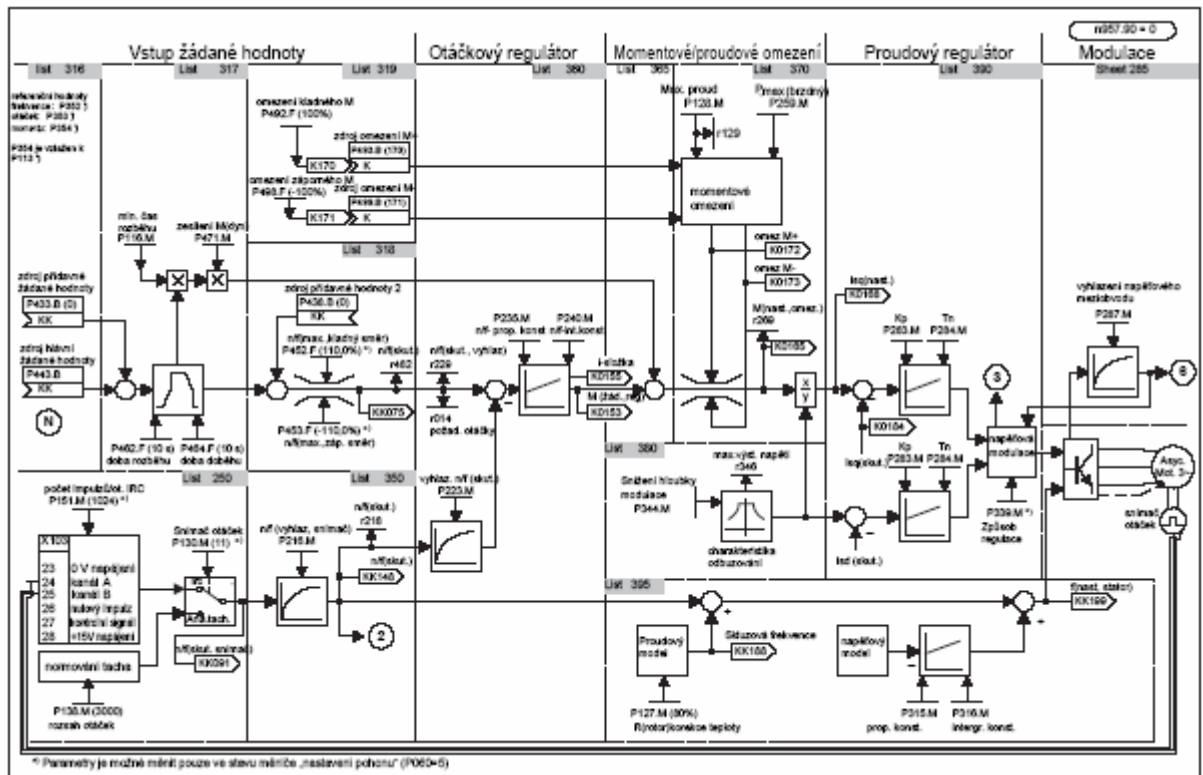
9 Literatura

- [1] Javůrek, J. Regulace moderních elektrických pohonů. Grada Publishing, a.s., 2003. ISBN 80-247-0307-9
- [2] Kubín, J. Způsoby frekvenčního řízení asynchronního motoru z hlediska dynamiky. Liberec, 2006. Autoreferát disertační práce na Fakultě mechatroniky a mezipodborových inženýrských studií Technické univerzity v Liberci.
- [3] Pavelka, J. – Čeřovský, Z. – Javůrek, J. Elektrické pohony. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02314-1.
- [4] Simovert Masterdrives Vector Control, Compendium. 6SE7087-6QX60. Siemens AG, 1998.
- [5] Simovert Masterdrives Vector Control, Návod k obsluze a údržbě. BA 0005-348-009 PZ. Siemens AG, 1998.
- [6] Vittek, J. – Dodds, S. J. Riadenie elektrických pohonov s vnútenou dynamikou. Žilina: EDIS, 2003. ISBN 80-8070-087-7.
- [7] internetové stránky firmy Humusoft, www.humusoft.cz
- [8] internetové stránky firmy Siemens, www.siemens.de
- [9] internetové stránky firmy Omega Engineering, www.omegaeng.cz

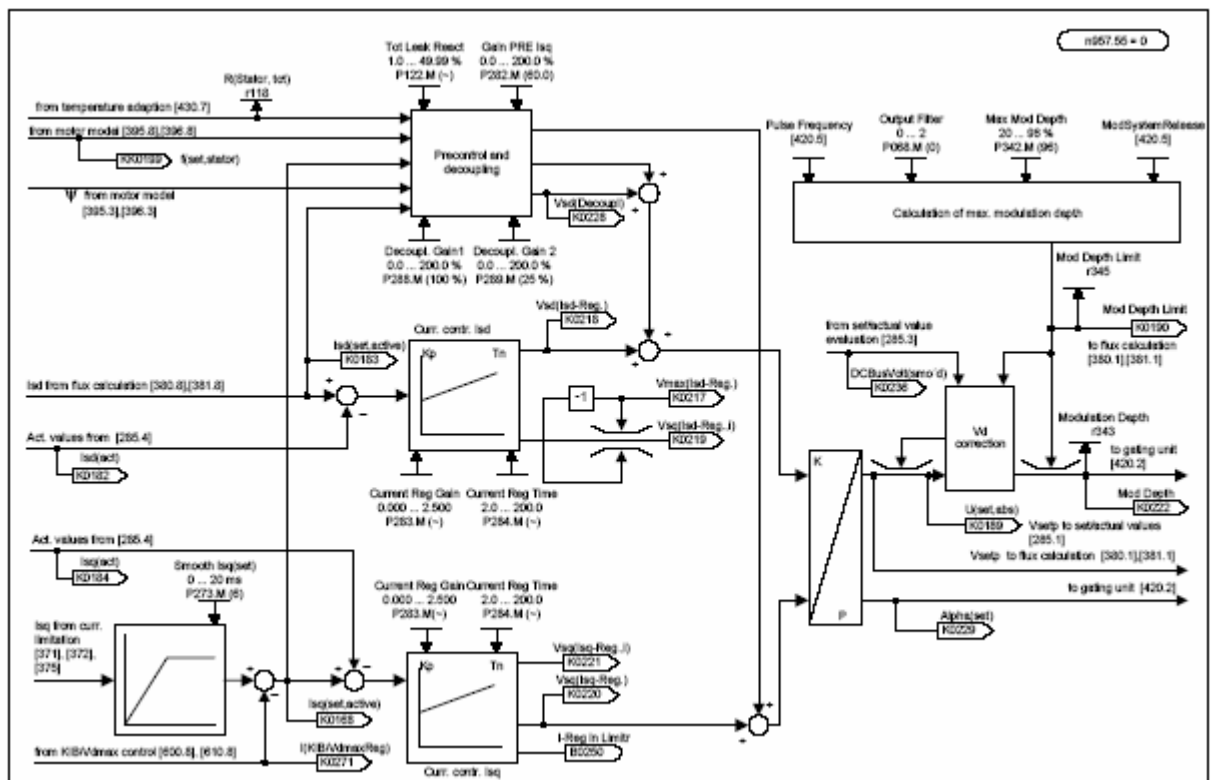
10 Přílohy

- A.** Schéma vektorového řízení se zpětnou otáčkovou vazbou – regulace momentu
- B.** Schéma proudového PI regulátoru
- C.** Fotografie pracoviště

10.1.1 Příloha A: Blokové schéma vektorového řízení



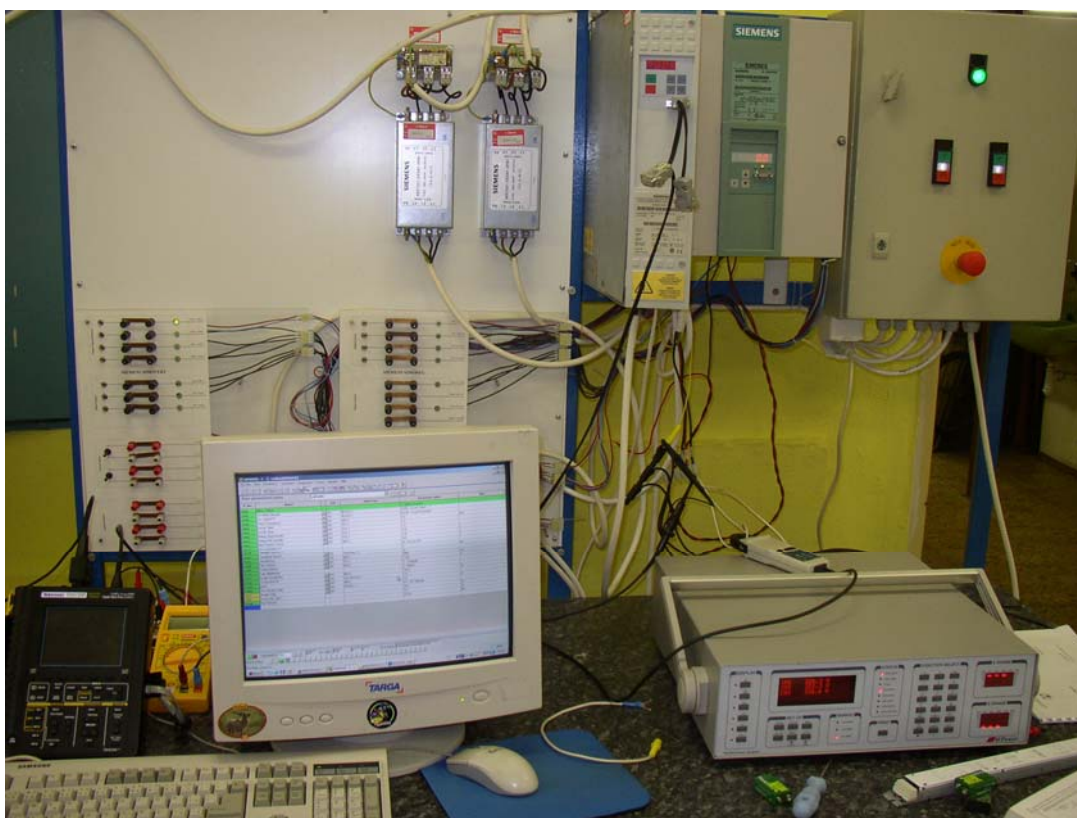
10.1.2 Příloha B: Blokové schéma proudového regulátoru



10.1.3 Příloha C: Fotodokumentace



Obr. C-1: Asynchronní motor (vlevo) a stejnosměrný motor (vpravo) v laboratoři EL2



Obr. C-2: Pracoviště pro ovládání pohonu